

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

MATHEUS CARVALHO BARRETO

**ANÁLISE DA REDISTRIBUIÇÃO DOS ESFORÇOS EM ELEMENTOS
ESTRUTURAIS DE UM EDIFÍCIO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS MEDIANTE A
POSSIBILIDADE DA OCORRÊNCIA DE COLAPSO PROGRESSIVO**

Jataí
2022



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico/Tecnológico - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Matheus Carvalho Barreto

Matrícula: 20181020260310

Título do Trabalho: Análise da redistribuição dos esforços em elementos estruturais de um edifício de múltiplos pavimentos mediante a possibilidade da ocorrência de colapso progressivo

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Jaraguá

Local

20/03/22

Data

Matheus Carvalho Barreto

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

MATHEUS CARVALHO BARRETO

**ANÁLISE DA REDISTRIBUIÇÃO DOS ESFORÇOS EM ELEMENTOS
ESTRUTURAIS DE UM EDIFÍCIO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS MEDIANTE A
POSSIBILIDADE DA OCORRÊNCIA DE COLAPSO PROGRESSIVO**

Trabalho apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador(a): Prof.^a Dr^a. Mônica Maria Emerenciano Bueno.

Jataí
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)

Barreto, Matheus Carvalho.

Análise da redistribuição dos esforços em elementos estruturais de um edifício de múltiplos pavimentos mediante a possibilidade da ocorrência de colapso progressivo [manuscrito] / Matheus Carvalho Barreto. -- Jataí: IFG, Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, 2022.

74f. ; il.

Orientadora: Profa. Dra. Mônica Maria Emerenciano Bueno.

Bibliografias.

1. Colapso progressivo. 2. Redistribuição de esforços. 3. Falha estrutural. 4. Modelagem computacional. I. Bueno, Mônica Maria Emerenciano. II. IFG, Câmpus Jataí. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Téc.: Aquisição e Tratamento da Informação.

Bibliotecária - Rosy Cristina O. Barbosa - CRB 1/2380 – C. Jataí. Cód. F027/2022-1.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS JATAÍ

Folha de Aprovação

MATHEUS CARVALHO BARRETO

ANÁLISE DA REDISTRIBUIÇÃO DOS ESFORÇOS EM ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE UM EDIFÍCIO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS MEDIANTE A POSSIBILIDADE DA OCORRÊNCIA DE COLAPSO PROGRESSIVO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado, em 05 de fevereiro de 2022, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dr^ª. Mônica Maria Emerenciano Bueno
Presidente da banca / Orientador
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Eulher Chaves Carvalho
Membro Interno
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Me. Vitor Freitas Gonçalves
Membro Externo
UNA - Jataí

Jataí – GO
2022

Documento assinado eletronicamente por:

- **Matheus Carvalho Barreto, MATHEUS CARVALHO BARRETO - ESTUDANTE - IFG - CAMPUS JATAÍ (10870883000306)**, em 10/03/2022 20:40:35.
- **Eulher Chaves Carvalho, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 14/02/2022 08:08:43.
- **Vitor Freitas Goncalves, PROF ENS BAS TEC TECNOLOGICO-SUBSTITUTO**, em 12/02/2022 08:10:39.
- **Monica Maria Emerenciano Bueno, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 11/02/2022 18:50:26.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 31/01/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 241078

Código de Autenticação: d9df0b77d5



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Rua Maria Vieira Cunha, nº 775, Residencial Flamboyant, JATAÍ / GO, CEP 75804-714
(64) 3605-0837 (ramal: 837)

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço a Deus, pelo seu amor incondicional em minha vida, sempre me capacitando em todos os momentos em que precisei durante este longo caminho que é a graduação, pois sem Ele em minha vida nada seria possível.

Aos meus pais Onassis e Geane, que sempre se esforçaram em poder me dar o melhor dentro de suas condições com muito amor e carinho, juntamente com meus irmãos Beatriz e Thiago, que guardaram para si a dor da minha ausência diária para sonharem comigo este sonho que se tornou real.

Aos meus tios Eliandro e Rosigleiby, que no dia 21 de março de 2018, junto com os meus primos Guilherme e Lucas me receberam em sua casa com muito afeto e carinho, serei eternamente grato.

À minha namorada Andressa Prado, pelo apoio em todos os momentos durante essa caminhada, e por sempre estar ao meu lado junto com os nossos 5 filhos de patas.

À minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Mônica Maria Emerenciano Bueno, por demonstrar todo apoio, paciência e conhecimento, sendo este último, compartilhado de forma única e excepcional.

À empresa TQS Informática, pela disponibilização da licença TQS Pleno Educacional para que fosse possível realizar este trabalho e apoio junto ao seu departamento de suporte.

Por fim agradeço a todos os amigos, em especial a Emillyn Dourado que esteve sempre empenhada em compartilhar seus conhecimentos e ajuda, aos professores e colegas de curso que tive a honra de conhecer durante estes anos de graduação e a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para que este sonho se tornasse realidade.

RESUMO

BARRETO, M. C. (2022). **Análise da redistribuição dos esforços em elementos estruturais de um edifício de múltiplos pavimentos mediante a possibilidade da ocorrência de colapso progressivo**. 74p. Trabalho de conclusão do curso em Bacharelado em Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. Jataí, 2022.

O Colapso progressivo é um fenômeno de ruína estrutural que ocorre por meio da propagação de uma falha inicial na estrutura que pode ter sido por diversos tipos de erros, seja durante a concepção, construção ou uso da edificação. A falha inicial de um elemento estrutural, se propaga para os demais elementos estruturais, que por consequência são sobrecarregados, podendo ou não resultar no colapso de toda ou de grande parte da estrutura. A ocorrência dos primeiros casos despertou a necessidade de estudos em outros países, que por consequência deste avanço inicial, vem elaborando medidas de prevenção ao colapso progressivo fundamentadas em suas normas regulamentadoras. No Brasil, esse tema começou a ser estudado posterior aos primeiros casos de ocorrência, que consequentemente, resultou em um tema que possui poucas informações normativas consistentes. Neste trabalho foi realizado uma breve introdução sobre o fenômeno colapso progressivo, expondo os tipos existentes, as principais causas e as possíveis medidas para prevenção. Posteriormente, por meio do software de modelagem estrutural em parceria com a empresa TQS, um edifício fictício de 20 pavimentos foi modelado e algumas análises foram realizadas através da retirada de pilares predeterminados, que resultaram em diferentes maneiras da redistribuição dos esforços nos demais elementos estruturais como pilares e vigas. No estudo foi possível observar um padrão na redistribuição dos esforços quando submetidos a novos esforços oriundos da retirada dos elementos de apoio predefinidos, bem como a possibilidade de ocorrência do fenômeno nos exemplos abordados.

Palavras-chave: colapso progressivo; redistribuição de esforços; falha estrutural; modelagem computacional.

ABSTRACT

BARRETO, M. C. (2022). **Analysis of the redistribution of forces in structural elements of a multiples building through the possibility of the occurrence of progressive collapse**. 74p. Final course work Bachelor of Civil Engineering, Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de Goiás. Jataí, 2022.

Progressive collapse is a phenomenon of structural failure that occurs through the propagation of an initial failure in the structure that can be produced by various types of errors, either during the design, construction or use of the building. The initial failure of a structural element propagates to the other structural elements, which are consequently overloaded, which may or may not result in the collapse of all or a large part of the structure. The occurrence of the first cases aroused the need for studies in other countries, which, as a result of this initial advance, developed measures to prevent progressive collapse based on their regulatory standards. In Brazil, this topic began to be studied after the first cases of occurrence, which consequently resulted in a topic that lacks consistent normative information. In this work, a brief introduction about the progressive collapse phenomenon was carried out, exposing the existing types, the main causes and possible measures for prevention. Subsequently, through the structural modeling software in partnership with the company TQS, a fictitious 20-story building was modeled and some analyzes were carried out through the removal of predetermined pillars, which resulted in different behavior of the other structural elements such as pillars and beams. In the study it was possible to observe a standard redistribution of stresses when subjected to high stresses arising from the removal of predefined support elements, as well as the possibility of the phenomenon occurring in the examples discussed.

Keywords: progressive collapse; redistribution of forces; structural failure; computational modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Edifício Ronan Point após o colapso parcial	12
Figura 1.2 - Edifício Alfred P. Murrah anteriormente ao atentado	18
Figura 1.3 - Edifício Alfred P. Murrah posteriormente ao atentado.....	18
Figura 1.4 - Detalhamento esquemático da planta do 9º pavimento	19
Figura 1.5 - Localização dos prédios situados próximos a Theatro Municipal	19
Figura 1.6 - Edifício Liberdade após desabamento	20
Figura 2.1 - Exemplificação da ocorrência de colapso progressivo.....	23
Figura 2.2 - Ilustração dos danos mediante a possibilidade da ocorrência de colapso progressivo após retirada de um pilar borda	25
Figura 2.3 – Ilustração dos tipos de Colapso Progressivo	26
Figura 2.4 - Etapas do colapso progressivo de tipo panqueca.....	27
Figura 2.5 - Etapas do colapso progressivo tipo Zipper	28
Figura 2.6 - Etapas do colapso progressivo tipo dominó.....	29
Figura 2.7 - Etapas do colapso progressivo por instabilidade	30
Figura 2.8 - Principais causas para ocorrência de colapso progressivo.....	31
Figura 2.9 - Ponte Octávio Frias de Oliveira.....	33
Figura 2.10 - Elemento estrutural que não possui características que previne o colapso progressivo	34
Figura 3.1 - Apresentação da interface do software CAD/TQS versão 22.11.21	35
Figura 3.2 - Planta de forma do pavimento tipo.....	36
Figura 3.3 - Corte esquemático do edifício fictício.....	37
Figura 3.4 - Visualização 3D da estrutura do edifício fictício em concreto armado. ...	38
Figura 3.5 - Mapa de isopletas	40
Figura 3.6 - Apresentação dos quadrantes formados pela simetria do edifício fictício	44
Figura 3.7 - Posição dos pilares removidos (sem escala, dimensões em centímetros)	45
Figura 4.1 - Ilustração dos esforços normais nos pilares do pavimento térreo	48
Figura 4.2 - Envoltória de momento fletor característico de solicitação para a viga V201 referente ao vão I	51
Figura 4.3 - Envoltória de momento fletor característico de solicitação para a viga V202 referente ao vão I	51

Figura 4.4 - Envoltória de momento fletor característico de solicitação para a viga V206 referente ao vão I	51
Figura 4.5 - Envoltória de momento fletor característico de solicitação para a viga V204 referente ao vão I	51
Figura 4.6 - Envoltória de momento fletor característico de solicitação para a viga V203 referente ao vão I	51
Figura 4.7 - Envoltória de momento fletor característico de solicitação para a viga V205 referente ao vão I	51
Figura 4.8 - Ilustração do edifício fictício de 20 pavimentos em modelagem 3D	52
Figura 4.9 - Ilustração dos esforço normal nos pilares do Exemplo 2 com as respectivas variações	53
Figura 4.10 – Seção transversal do pilar P6	55
Figura 4.111 – Ilustração do encontro entre as vigas V201 e V206	56
Figura 4.12 - Seção transversal da viga V201.....	57
Figura 4.13 - Ilustração do edifício fictício de 20 pavimentos em modelagem 3D após a remoção do pilar P6 no térreo	59
Figura 4.14 - Ilustração do esforço normal nos pilares do Exemplo 3 com as respectivas variações	61
Figura 4.15 - Seção transversal do pilar P1	62
Figura 4.16 - Ilustração do encontro entre as vigas V202 e V206.....	63
Figura 4.17 - Seção transversal da viga V206.....	64
Figura 4.18 - Ilustração do edifício fictício de 20 pavimentos em modelagem 3D após a remoção do pilar P7 no térreo	65
Figura 4.19 - Ilustração dos esforço normal nos pilares do Exemplo 4 com as respectivas variações	66
Figura 4.20 - Seção transversal do pilar P8	68
Figura 4.21 - Ilustração do encontro entre as vigas V202 e V207	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Limites que caracterizam a possibilidade da ocorrência de colapso progressivo	25
Tabela 3.1 - Dados e parâmetros considerados para o cálculo da carga do vento na estrutura	41
Tabela 3.2 - Resultados obtidos após utilização do software	41
Tabela 3.3 - Resumo das combinações no modelo global	42
Tabela 3.4 - Combinações geradas pelo software CAD/TQS para o modelo global do edifício fictício	42
Tabela 3.5 - Resumo dos exemplos abordados no trabalho	44
Tabela 4.1 - Maiores valores obtidos em relação ao esforço normal em pilares	47
Tabela 4.2 - Valores obtidos referentes ao momento fletor característico de solicitação Msk	49
Tabela 4.3 - Comparativo entre o exemplo 1 e exemplo 2 após remoção do pilar P1	53
Tabela 4.4 - Comparativo entre os valores obtidos de momento fletor característico de solicitação Msk entre o Exemplo1 e Exemplo 2	57
Tabela 4.5 - Comparativo entre o exemplo 1 e exemplo 3 após remoção do pilar P6	60
Tabela 4.6 – Comparativo entre os valores obtidos de momento fletor característico de solicitação Msk entre o Exemplo1 e Exemplo 3	64
Tabela 4.7 - Comparativo entre o exemplo 1 e exemplo 4 após remoção do pilar P7	66
Tabela 4.8 - Comparativo entre os valores obtidos de momento fletor característico de solicitação Msk entre o Exemplo 1 e Exemplo 4	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NIST	National Institute of Standards and Technology
EUROCODE	Comité Europeu de Normatização
ELU	Estado de limite último
ELS	Estado limite de serviço
PP	Peso próprio
PERM	Cargas permanentes
ACID	Cargas acidentais
VENT1	Vento (1) 90°
VENT2	Vento (2) 270°
VENT3	Vento (3) 0°
VENT4	Vento (4) 180°
TODAS_V	Todas permanentes e acidentais dos pavimentos – VTN
PP_V	Peso próprio – VTN
PERM_V	Cargas permanentes – VTN
ACID_V	Cargas acidentais – VTN

LISTA DE SÍMBOLOS

B	Dimensão na direção horizontal referente ao elemento estrutural
H	Dimensão na direção vertical referente ao elemento estrutural
HL	Espessura referente ao elemento estrutural laje
V0	Velocidade básica do vento
S1	Fator do terreno
S2	Categoria de rugosidade
S2'	Classe da edificação
S3	Fator estatístico
f_{yd}	Tensão de escoamento do aço
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão
MPa	Mega Pascal
M_{SK}	Momento fletor característico de solicitação

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	17
1.1 JUSTIFICATIVA	18
1.2 OBJETIVOS	21
1.2.1 Objetivo Geral	21
1.2.2 Objetivos Específicos	21
1.3 ESTRUTURAÇÃO DOS CAPÍTULOS.....	22
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 COLAPSO PROGRESSIVO.....	23
2.2 CARACTERÍSTICAS DO COLAPSO PROGRESSIVO.....	24
2.3 TIPOS DE COLAPSO PROGRESSIVO	26
2.3.1 Colapso tipo panqueca (pancake-type-collapse):.....	26
2.3.2 Colapso tipo zipper (zipper-type-collapse):	27
2.3.3 Colapso progressivo tipo dominó (domino-type-collapse):.....	28
2.3.4 Colapso progressivo tipo seção (section-type-collapse):.....	29
2.3.5 Colapso progressivo tipo instabilidade (instability-type-collapse):.....	30
2.3.6 Colapso progressivo tipo misto (instability-type-collapse):	31
2.4 PRINCIPAIS CAUSAS DA OCORRÊNCIA DE COLAPSO PROGRESSIVO.....	31
2.5 ESTRUTURAS MAIS SUSCETÍVEIS A OCORRÊNCIA	32
2.6 MEDIDAS DE PREVENÇÃO AO COLAPSO PROGRESSIVO	33
2.6.1 Redundância:	33
2.6.2 Ductilidade:.....	34
2.6.3 Continuidade:	34
CAPÍTULO 3 METODOLOGIA.....	35
3.1 APRESENTAÇÃO DO SOFTWARE CAD/TQS	35
3.2 APRESENTAÇÃO DO EDIFÍCIO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS	36
3.2.1 Disposição arquitetônica	36
3.2.2 Elementos estruturais constituintes do edifício fictício	38
3.2.3 Propriedades dos materiais utilizados	39
3.2.3.1 Concreto.....	39
3.2.3.2 Armadura.....	39
3.3 CARREGAMENTOS CONSIDERADOS	39
3.3.1 Carregamentos verticais.....	39
3.3.2 Carregamentos horizontais	40

3.3.3 Combinações de ações	42
3.4 APRESENTAÇÃO DOS EXEMPLOS REFERENTE AO ESTUDO	43
CAPÍTULO 4 RESULTADOS	46
4.1 EXEMPLO 1: EDIFÍCIO FICTÍCIO ORIGINAL	46
4.1.1 Esforços obtidos após análise: Pilares	46
4.1.2 Esforços obtidos após análise: Vigas	49
4.2 EXEMPLO 2: REMOÇÃO DO PILAR P1 – PILAR DE CANTO	52
4.2.1 Redistribuição dos esforços em: Pilares	52
4.2.2 Redistribuição dos esforços em: Vigas	56
4.3 EXEMPLO 3: REMOÇÃO DO PILAR P6 – PILAR DE BORDA	59
4.3.1 Redistribuição dos esforços em: Pilares	60
4.3.2 Redistribuição dos esforços em: Vigas	63
4.4 EXEMPLO 4: REMOÇÃO DO PILAR P7 – PILAR DE CENTRO	65
4.4.1 Redistribuição dos esforços em: Pilares	65
4.4.2 Redistribuição dos esforços em: Vigas	69
CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
REFERÊNCIAS	73

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

O colapso progressivo é um fenômeno de ruína estrutural que apresenta como característica a propagação de uma falha inicial pontual que em sua maioria é resultante de diversos erros, sejam estes produzidos durante a fase de projeto, construção ou utilização da edificação. A falha local que se inicia em um elemento estrutural, se propaga para os demais elementos estruturais da edificação, que por consequência, são sobrecarregados, podendo então resultar no colapso de toda ou de grande parte da estrutura da edificação

Os estudos referentes ao fenômeno despertaram-se após a ocorrência do colapso parcial do edifício de apartamentos *Ronan Point*, em Londres, no ano de 1968 (LARANJEIRAS, 2011). Este edifício de 22 andares, era constituído por paredes e lajes pré-moldadas em concreto protendido que, após uma explosão causada por um vazamento de gás no 18º andar, resultou no colapso progressivo parcial do edifício, conforme ilustrado na **Erro! Autoreferência de indicador não válida..** Estudos posteriores ao evento, revelaram que a ausência da parede que sustentava a laje do pavimento superior, resultou no desabamento das paredes e lajes dos andares superiores, que consequentemente, sobrecarregaram os demais pavimentos inferiores, ou seja, a propagação do colapso a partir da falha pontual inicial, se deu em direção ao último pavimento e posteriormente na direção sentido ao térreo da edificação.



Figura 1.1 - Edifício Ronan Point após o colapso parcial

Outro caso bastante significativo para continuidade dos estudos referente ao fenômeno foi o ataque terrorista ao edifício *Alfred P. Murrah*, em Oklahoma City, no ano de 1995 (LARANJEIRAS, 2011). Neste edifício funcionavam diversos escritórios ligados ao governo norte americano, e após a explosão de um caminhão bomba estacionado na frente do prédio, grandes danos à parte frontal do prédio foram causados conforme apresentado na Figura 1.3 e na Figura 1.2. Estudos posteriores ao evento, revelaram que a ausência de três pilares que sustentavam uma viga do terceiro pavimento foram rapidamente destruídos por consequência da explosão, resultando assim, no colapso progressivo dos demais pavimentos superiores (DIMAS, 2014).

Figura 1.2 - Edifício Alfred P. Murrah anteriormente ao atentado



Fonte: INCRÍVEL HISTÓRIA (2019)

Figura 1.3 - Edifício Alfred P. Murrah posteriormente ao atentado



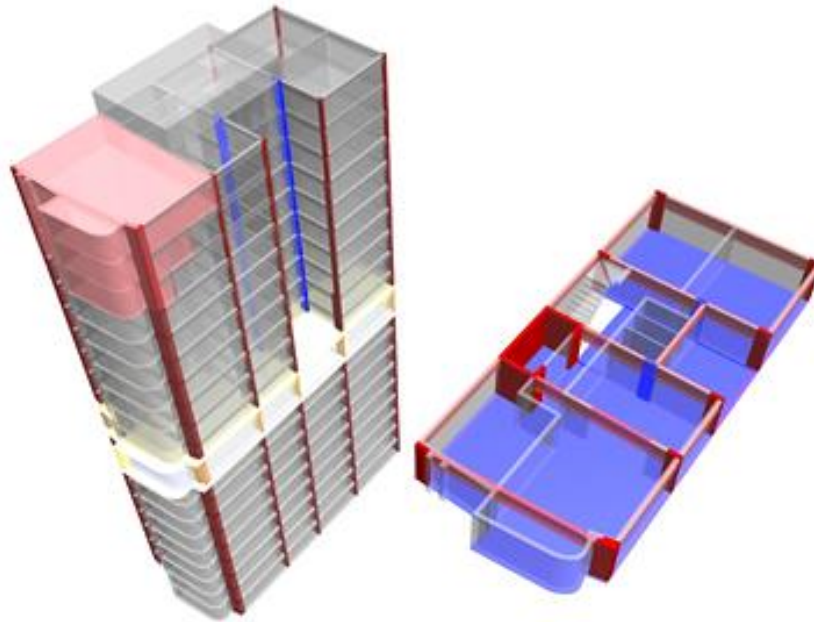
Fonte: INCRÍVEL HISTÓRIA (2019)

1.1 JUSTIFICATIVA

No Brasil, casos referentes ao colapso progressivo também podem ser encontrados, como por exemplo, o Edifício Liberdade, na cidade do Rio de Janeiro, em 2012. Este Edifício era composto por vinte andares e após a remoção de um pilar localizado no 9º pavimento durante uma reforma, conforme apresentado na Figura 1.4, resultou-se no seu desabamento, que ainda atingiu e causou a queda de dois edifícios vizinhos: o Edifício Colombo, constituído por dez andares, e o Edifício Treze de Maio,

constituído por quatro andares, conforme ilustrado na Figura 1.5 e na Figura 1.6. Ao todo 22 pessoas morreram neste desastroso acidente (LARANJEIRAS, 2011).

Figura 1.4 - Detalhamento esquemático da planta do 9º pavimento



Fonte: GACEL ENGENHARIA (2013)

Figura 1.5 - Localização dos prédios situados próximos a Theatro Municipal



Fonte: TERRA (2013)

Figura 1.6 - Edifício Liberdade após desabamento



Fonte: ISTOÉ (2012)

Quando se observa os estudos relacionados a este tema em países estrangeiros, tem-se a nítida percepção de que este fenômeno ainda é pouco estudado no Brasil (SOUSA, 2021). Segundo Laranjeiras (2011) “as nossas normas referem-se ao fenômeno colapso progressivo dos edifícios de forma sumária, enigmática e instigante.” Verdadeiramente, é possível citar como exemplo a NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos (ABNT, 2014) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que argumenta sobre o fenômeno colapso progressivo brevemente, no qual o item 10.3 da referida norma aponta que a segurança das estruturas de concreto sempre deve ser verificada em relação ao estado limite último de colapso progressivo, sem mencionar como realizar essa verificação. Além disso, em seu item 19.5.4, ela simplesmente recomenda que para lajes lisas, a armadura de flexão deve estar suficientemente ancorada para “garantir a ductilidade local e consequente proteção contra o colapso progressivo” (SOUSA, 2021).

A NBR 9062 – Projeto e execução de estruturas em concreto pré-moldado (ANBT, 2017), mais especificamente em seu item 5.1.1.4 recomenda: “devem ser tomados cuidados especiais na organização geral da estrutura e nos detalhes construtivos, de forma a minimizar a possibilidade de colapso progressivo”. Porém, a referida norma também não informa quais são as diretrizes mínimas a serem consideradas para que sejam observados os cuidados especiais a que se refere (SOUSA, 2021).

Ademais, pode-se ressaltar que para o dimensionamento de uma edificação, o projetista estrutural precisa levar em consideração todas as possíveis combinações de ações descritas na NBR 8681 – Ações e segurança nas estruturas – Procedimentos (ABNT, 2004). Entretanto, é válido analisar conforme exposto por Felipe (2017, p.38), sobre a referida norma:

Não traz os coeficientes de ponderação de ações que levem em considerações dos danos acidentais ou colapso progressivo na estrutura. Isto implica, que em um eventual incremento de carga devido aos danos acidentais nas envoltórias de ações da estrutura, aumente a probabilidade de ocorrência de colapso local e/ou global da edificação.

Portanto, devido a informações normativas insuficientes e estudos mais aprofundados sobre o referido assunto no âmbito nacional, justifica-se a relevância de se elaborar estudos sobre esse tema, visto que a ocorrência do colapso progressivo pode levar as consequências vinculadas a danos financeiros e principalmente a perda de vidas humanas.

1.2 OBJETIVOS

A seguir, os objetivos deste trabalho serão apresentados atendendo às especificidades estabelecidas por meio de: objetivo geral e objetivo específico.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar o comportamento estrutural de um edifício de múltiplos pavimentos em concreto armado, quanto à possibilidade da ocorrência do fenômeno denominado colapso progressivo, através da redistribuição de esforços verticais e horizontais perante a retirada de pilares predeterminados.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho estão dispostos a seguir:

- Apresentar uma breve introdução sobre o estudo do fenômeno conhecido como colapso progressivo, expondo as suas definições, os tipos existentes, as principais causas e as possíveis medidas para prevenção;
- Analisar a redistribuição dos esforços em elementos estruturais, tais como vigas e pilares presentes em um edifício fictício em concreto armado, diante à

possibilidade da ocorrência de colapso progressivo em função da retirada de pilares predeterminados com auxílio do software TQS.

1.3 ESTRUTURAÇÃO DOS CAPÍTULOS

A estrutura organizacional deste trabalho está fundamentada conforme as descrições a seguir:

- Capítulo 1: São apresentados a introdução, justificativa e objetivos gerais e específicos do trabalho;
- Capítulo 2: É apresentado a revisão bibliográfica sobre o assunto para melhor compreensão e entendimento do tema;
- Capítulo 3: São apresentados os elementos estruturais e a disposição arquitetônica do edifício de múltiplos pavimentos deste trabalho;
- Capítulo 4: São apresentados os exemplos para fundamentação do estudo e posteriormente os resultados de cada um dos casos;
- Capítulo 5: Apresentação das considerações finais referente ao trabalho.

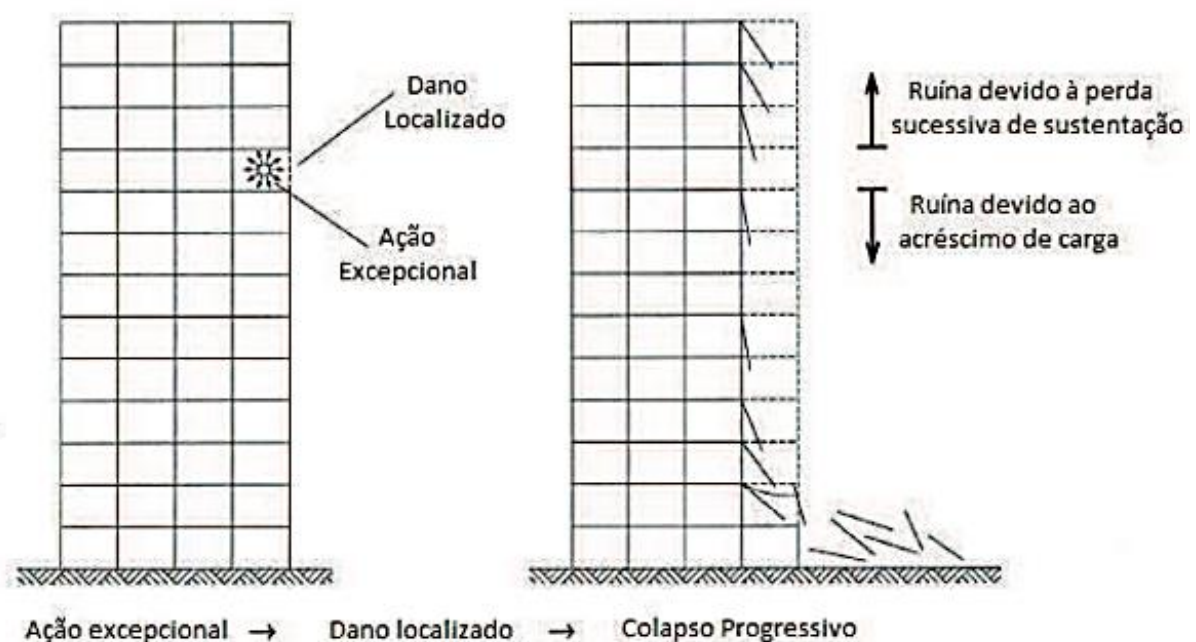
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 COLAPSO PROGRESSIVO

O termo colapso progressivo refere-se a ruína de toda ou grande parte de uma estrutura devido aos danos sofridos, podendo estes danos, serem obtidos por meio de falha humana: erros de projetos, construção; ou por eventos improváveis, tais como explosões e colisões de veículos (NAIR, 2007). De acordo com Laranjeiras (2011), a característica básica do colapso progressivo é que o estado final de ruptura é desproporcionalmente maior do que a ruptura inicial que originou o colapso.

A ruptura de um ou pequeno conjunto de elementos estruturais acarretam o colapso dos demais elementos adjacentes e associados a ele(s), que por consequência, levam ao colapso os demais membros estruturais constituintes da estrutura como um todo, resultando assim, em uma falha estrutural similar a uma reação em cadeia. Na Figura 2.1 é possível observar por meio da ilustração como funciona a ocorrência desse fenômeno em um edifício de múltiplos pavimentos, em que um dano localizado, causado por uma ação excepcional, leva ao colapso dos elementos estruturais associados, que por sua vez, não são capazes de resistir às cargas e esforços transferidos a eles, fazendo com que toda a estrutura ou parte dela, entre em colapso.

Figura 2.1 - Exemplificação da ocorrência de colapso progressivo



O National Institute of Standards and Technology (NIST, 2007) descreve o fenômeno de colapso progressivo como sendo uma “propagação de um dano local em um elemento estrutural que se propaga para outro, causando eventualmente o colapso de toda ou grande parte da estrutura”; demonstrando assim que existe uma desproporcionalidade quando se compara o evento causal com o evento final.

Já para o Comitê Europeu de Normatização (EUROCODE 1, 2006), não há uma definição específica para colapso progressivo, contudo, existe o conceito de robustez, que é definida como a habilidade de uma estrutura resistir a eventos extremos como explosões, incêndios ou consequências de erros de projetos e/ou construção, sem que seja danificada de maneira desproporcional ao dano inicial. Portanto, quanto mais robusta for a estrutura, menos suscetível ela será ao fenômeno.

2.2 CARACTERÍSTICAS DO COLAPSO PROGRESSIVO

Tendo como base o relatório produzido pelo National Institute of Standards and Technology Interagency or Internal Report (NISTIR, 7396:2007), cujo objetivo do relatório foi apresentar as melhores práticas atuais para se reduzir a probabilidade de colapso progressivo em edifícios, será apresentado a seguir, algumas orientações normativas em relação as características do colapso progressivo:

- **British Standards BS 5950-1 (2000):** Os padrões britânicos não usam as palavras colapso progressivo, mas sim colapso estrutural desproporcional para a causa inicial. Assim, a propagação horizontal, é limitada à 15% do piso (ou forro) ou 100 m², utilizando o menor valor entre estes. Já com relação a propagação vertical, essa é limitada em que os danos se propagam em um nível adjacente, seja este acima ou abaixo referente ao nível inicial do dano;
- **New York City Building Code (1998):** O colapso progressivo é interpretado como falha estrutural que se estende verticalmente em mais de três andares e horizontalmente em uma área mais de 100 m² ou 20% da área horizontal do edifício, utilizando sempre o menor valor.
- **Eurocode 1 (2006):** Considera como colapso progressivo, casos em que ações excepcionais causam danos que se propagam horizontalmente em mais de 15% da área de piso ou 100m², utilizando o menor valor entre estes, e na propagação vertical atinge mais de dois andares.

Na Tabela 2.1 é possível comparar e identificar os limites da propagação dos danos iniciais que caracterizam o colapso progressivo:

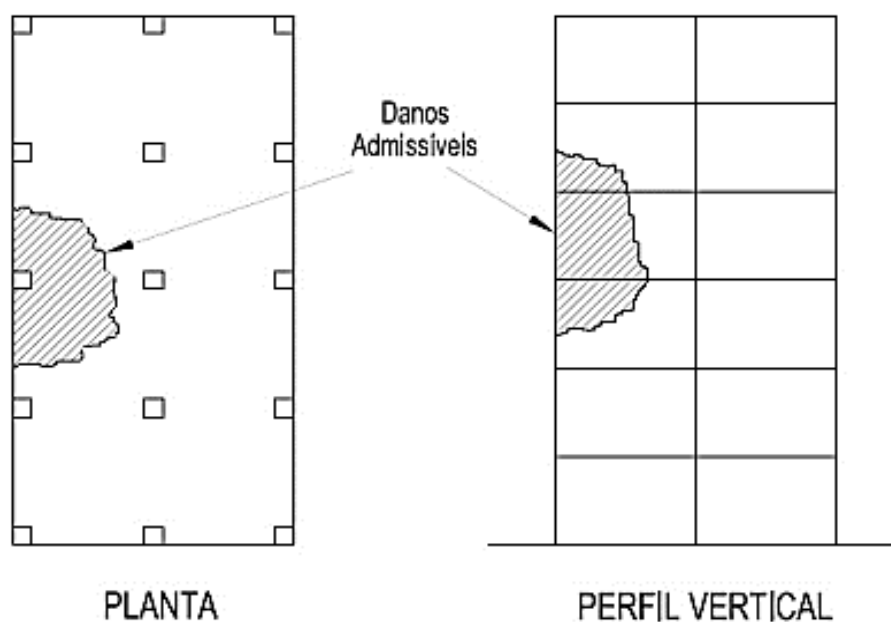
Tabela 2.1 - Limites que caracterizam a possibilidade da ocorrência de colapso progressivo

British Standards 5950-1:2000	NYC Building Code 1998	Eurocode 1 2006
PROPAGAÇÃO HORIZONTAL		
Casos em que ações excepcionais causam danos que se propagam até 15% da área de piso (ou forro) ou mais 100 m ² .	Casos em que ações excepcionais causam danos que se propagam até 20% da área de piso (ou forro) ou mais 100 m ² .	Casos em que ações excepcionais causam danos que se propagam até 15% da área de piso (ou forro) ou mais 100 m ² .
PROPAGAÇÃO VERTICAL		
Casos em que ações excepcionais causam danos que se propagam em um nível adjacente, seja este acima ou abaixo referente ao nível inicial.	Casos em que ações excepcionais causam danos que se propagam em mais de 3 andares.	Casos em que ações excepcionais causam danos que se propagam em mais de 2 andares.

Fonte: AUTOR (2022)

Na Figura 2.2 é ilustrada a possibilidades de propagação dos danos após a retirada de um pilar de borda, no qual em planta, observa-se a propagação horizontal dos danos no pavimento e no perfil vertical, observa-se a propagação dos danos entre os pavimentos.

Figura 2.2 - Ilustração dos danos mediante a possibilidade da ocorrência de colapso progressivo após retirada de um pilar borda



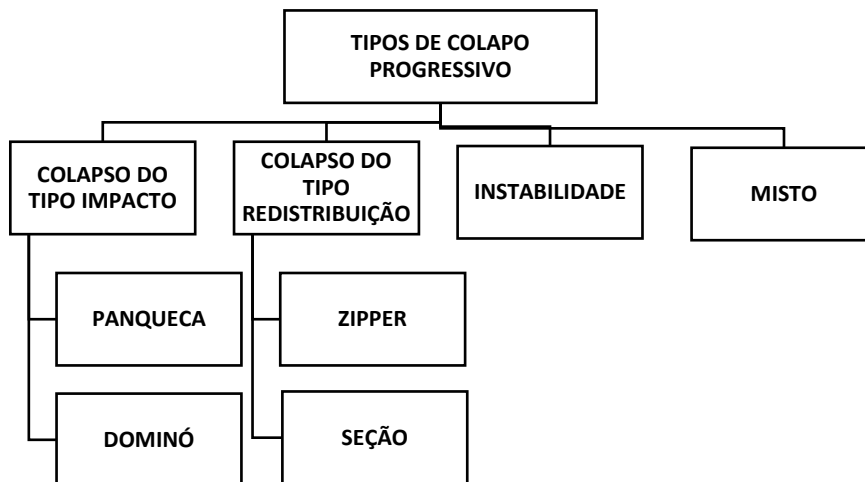
Fonte: EUROCODE 1 (2006)

2.3 TIPOS DE COLAPSO PROGRESSIVO

Conforme já apresentado, o colapso progressivo é caracterizado pela desproporcionalidade entre a causa inicial e o efeito resultante. Assim, para justificar tal desproporcionalidade, se faz necessário primeiramente entender que existem diferentes mecanismos causais que produzem tais resultados e portanto, para que se possa entender os efeitos, se faz útil descrever os tipos de colapso.

O colapso progressivo pode ser classificado em quatro tipos baseados nos diferentes mecanismos causais iniciais. Para Starossek (2009), os tipos são: pancueca, zipper, dominó, seção, instabilidade e misto, conforme apresentado pela Figura 2.3:

Figura 2.3 – Ilustração dos tipos de Colapso Progressivo



Fonte: AUTOR (2022)

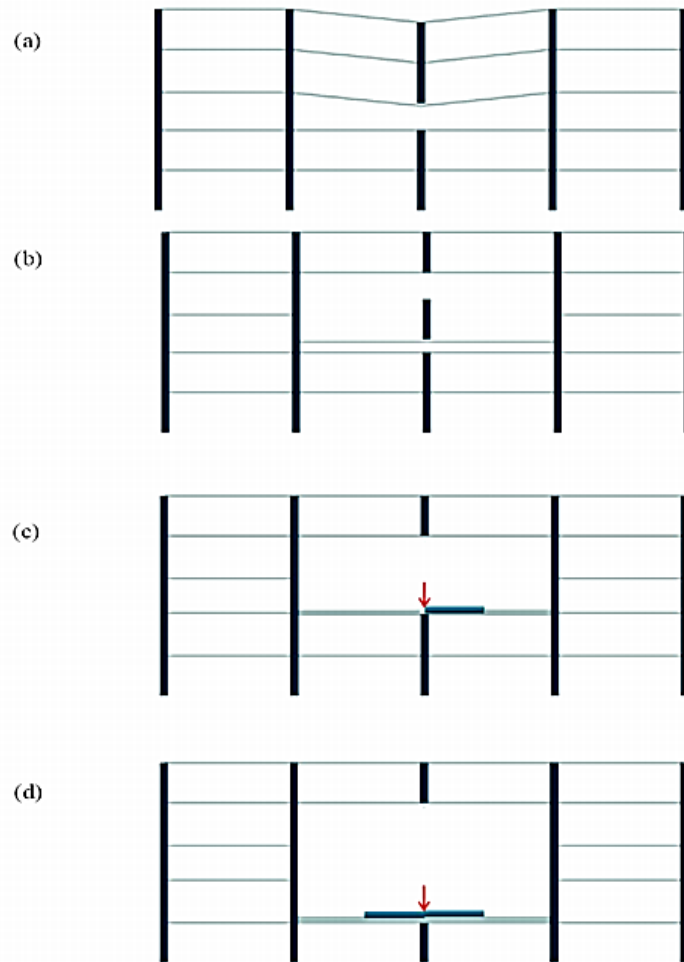
2.3.1 Colapso tipo pancueca (pancake-type-collapse):

Segundo Dimas (2014) e Starossek (2009) este tipo de colapso pode ser caracterizado pela perda da capacidade de suporte parcial ou total de um determinado elemento estrutural vertical, que por consequência, resulta no desmoronamento de um elemento superior da estrutura, fazendo com que os demais elementos estruturais localizados abaixo também venham a ruir pela sobrecarga, concebendo assim uma reação em cadeia.

Na Figura 2.4 é ilustrado o que Kozlova (2013) exemplifica detalhadamente nas etapas do colapso progressivo do tipo pancueca:

Figura 2.4 - Etapas do colapso progressivo de tipo panqueca

(a) Falha do elemento estrutural vertical; (b) Transformação da energia potencial em energia cinética; (c) Sobrecarga nos elementos estruturais abaixo; (d) Progressão da falha para os pavimentos inferiores.



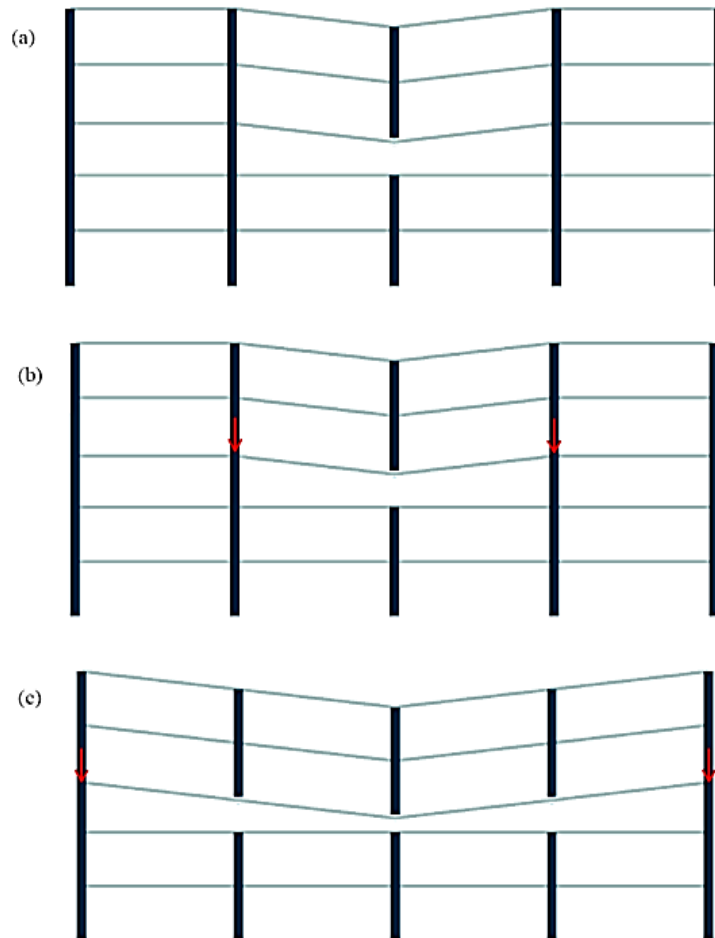
Fonte: KOZLOVA (2013)

2.3.2 Colapso tipo zipper (zipper-type-collapse):

Este tipo de colapso é caracterizado pela falha local de um ou mais elementos estruturais, onde após essa falha, os esforços destes elementos são redistribuídos para os demais elementos estruturais, gerando assim uma sobrecarga repentina aos elementos adjacentes, que conseqüentemente, levam à ruptura

Na Figura 2.5 é ilustrado o que Kozlova (2013) exemplifica detalhadamente nas etapas do colapso progressivo do tipo zipper:

Figura 2.5 - Etapas do colapso progressivo tipo Zipper
 (a) Falha inicial de um pilar; (b) Redistribuição do carregamento nos pilares próximos;
 (c) Sobrecarga nos demais pilares.



Fonte: KOZLOVA (2013)

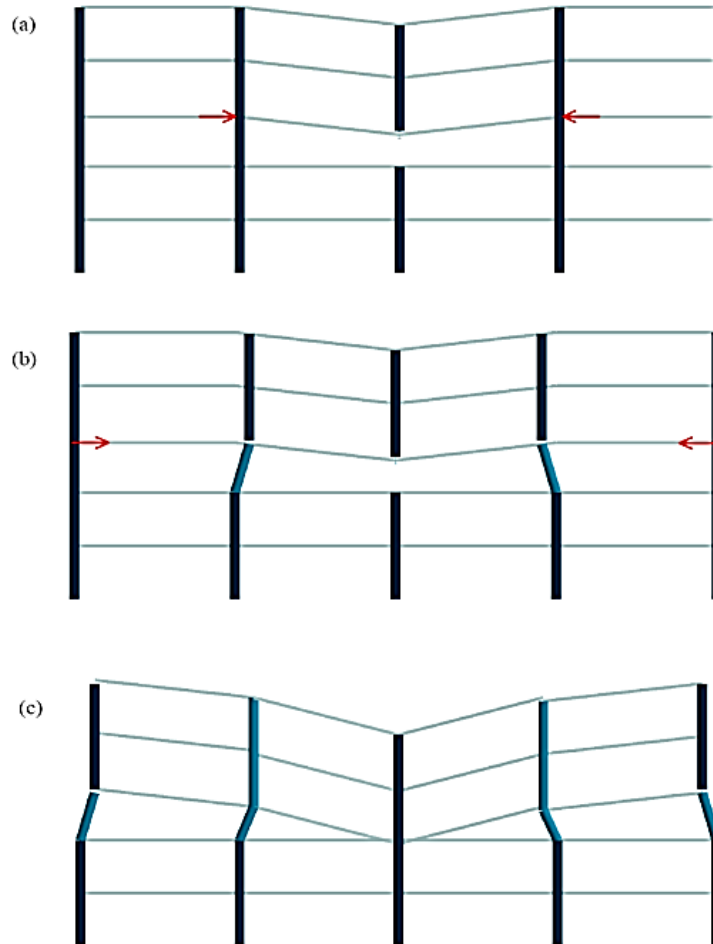
2.3.3 Colapso progressivo tipo dominó (domino-type-collapse):

As características deste tipo de colapso são os desenvolvimentos dos danos preferencialmente na direção horizontal entre os elementos estruturais, ou seja, a queda de um elemento estruturante individual provoca a queda do elemento seguinte e assim por diante no sentido de dentro para fora.

Na Figura 2.6, Kozlova (2013) exemplifica detalhadamente as etapas do colapso progressivo do tipo dominó:

Figura 2.6 - Etapas do colapso progressivo tipo dominó

(a) Falha de um elemento estrutural individual que consequentemente sobrecarrega os demais elementos próximos; (b) Queda dos pilares próximos que sobrecarregam os demais; (c) Progressão do colapso na direção horizontal.



Fonte: KOZLOVA (2013)

2.3.4 Colapso progressivo tipo seção (section-type-collapse):

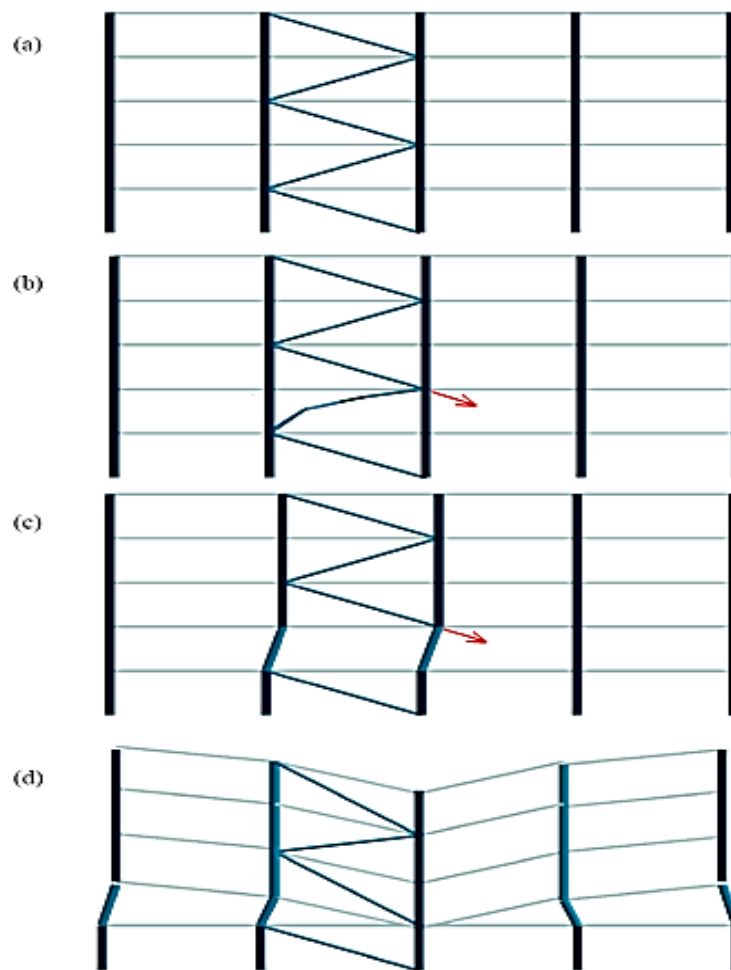
Este tipo de colapso é caracterizado pela propagação dos esforços quando um determinado elemento estrutural perde parte de sua seção transversal (devido ao momento de flexão ou tensão axial por exemplo), que por consequência, redistribui os esforços para a seção transversal remanescente bem como sobrecarrega criticamente os demais elementos. O aumento da tensão nestes elementos pode acarretar na ruptura de toda a seção transversal, ou parte dela.

2.3.5 Colapso progressivo tipo instabilidade (instability-type-collapse):

Para Starossek (2009), a instabilidade de uma estrutura é causada por pequenas irregularidades, como imperfeições ou carregamento transversal, que geram grandes deformações ou o colapso. Portanto, a falta da estabilidade de um ou mais elementos estruturais, por exemplo, estruturas de contraventamentos, podem tornar o sistema estrutural como um todo instável, ou seja, a instabilidade do elemento instável se propaga para os demais elementos estáveis, que por consequência podem resultar no colapso da estrutura.

Na Figura 2.7, Kozlova (2013) exemplifica detalhadamente as etapas do colapso progressivo do tipo instabilidade

Figura 2.7 - Etapas do colapso progressivo por instabilidade



Fonte: KOZLOVA (2013)

2.3.6 Colapso progressivo tipo misto (instability-type-collapse):

Este tipo de colapso é caracterizado pela simultaneidade de diversas falhas que se enquadram em diferentes categorias de colapso progressivo, ou seja, envolvem diversas combinações dos tipos relacionados anteriormente.

Segundo Starossek (2009), as características desse tipo de colapso ocorrem através de forças horizontais que levam ao tombamento dos demais elementos estruturais constituintes do edifício.

2.4 PRINCIPAIS CAUSAS DA OCORRÊNCIA DE COLAPSO PROGRESSIVO

Segundo Laranjeiras (2011), o colapso progressivo pode ocorrer por três principais causas, sendo elas conforme apresentado na Figura 2.8 a seguir:

Figura 2.8 - Principais causas para ocorrência de colapso progressivo

PRINCIPAIS CAUSAS		
Erros de projetos ou de construção	Ações variáveis abusivas	Ações variáveis excepcionais

Fonte: AUTOR (2022)

Assim, para Laranjeiras (2011), os erros de projetos ou construção são responsáveis pela maioria dos casos de colapso em edifícios, os quais podem ser cometidos por profissionais qualificados e com o uso de normas e processos de construção adequados. Tais erros se devem à falibilidade humana e podem ser minimizados por um melhor controle, supervisão e gestão de qualidade nas construções.

Em relação as ações variáveis abusivas, elas ocorrem quando os esforços de solicitação ultrapassam esforços considerados em projeto, e mesmo com as majorações e coeficientes de segurança, essa sobrecarga pode levar a falha de elementos estruturais (LARANJEIRAS, 2011).

Para as ações excepcionais, Laranjeiras (2011) destaca como sendo eventos com baixa possibilidade de ocorrência, tais como explosões de gás e bombas, colisões de veículos e aviões e situações ambientais extremas como terremotos e furacões.

2.5 ESTRUTURAS MAIS SUSCETÍVEIS A OCORRÊNCIA

Para além das características e os tipos existente referentes ao fenômeno de colapso progressivo, é preciso entender um aspecto importante associado às causas, que são os tipos de estruturas mais suscetíveis a ocorrência do fenômeno, ou seja, que possuem um maior grau de sensibilidade ou de vulnerabilidade atrelado a ocorrência do fenômeno.

Segundo Laranjeiras (2011), os fatores mais importantes para essa vulnerabilidade estrutural são a ausência ou deficiência da continuidade no sistema estrutural e a falta de eficiência na ductilidade dos materiais, elementos e ligações estruturais, pois alguns sistemas estruturais carecem de robustez, sendo pouco aptos a absorver ou a dissipar a energia que resulta de danos localizados.

Por exemplo, as lajes pré-moldadas, quando apoiadas em paredes de alvenaria estrutural, são mais vulneráveis em virtude das dificuldades em prover continuidade e ductilidade. Já com relação as lajes lisas ou lajes cogumelos, ambas podem ser vulneráveis em suas ligações com os pilares (LARANJEIRAS, 2011).

Portanto, para Laranjeiras (2011), as estruturas monolíticas integrais têm maior capacidade de distribuição de cargas em relação às que possuem juntas e aparelhos de ligação como as pré-moldadas, pois, próximo à região de apoio, existe uma sobrecarga de tensões, podendo assim contribuir na diminuição da zona em que os esforços tenderiam a continuidade.

2.6 MEDIDAS DE PREVENÇÃO AO COLAPSO PROGRESSIVO

Segundo Sousa (2021), a adoção de medidas direcionadas à prevenção do colapso progressivo podem acarretar em custos adicionais para execução de projetos e construção, no qual, mesmo que a probabilidade da ocorrência desse fenômeno seja baixa, é importante dimensionar a estrutura considerando a possibilidade de colapso parcial ou total do edifício.

Para isso, é necessário entender a importância da utilização de medidas preventivas ao colapso progressivo na fase de projeto e principalmente as suas finalidades, que resumidamente, são para evitar numerosos prejuízos à vida humana e/ou danos físicos à estrutura.

De acordo com Vasilieva (2013), algumas características estruturais quando abordadas durante a fase de projeto, contribuem diretamente na mitigação do risco de se ocorrer o fenômeno. Esse conjunto de características estão listados a seguir:

2.6.1 Redundância:

A redundância é caracterizada pela existência de alternativas diversas em redistribuir os esforços, ou seja, a possibilidade de se obter caminhos alternativos para que se possa redistribuir os esforços no caso da falha de algum elemento estrutural, contribui para prevenir o fenômeno (VASILIEVA, 2013). A Figura 2.9 apresenta a ponte Octávio Frias de Oliveira, localizada sobre o rio Pinheiros, no estado de São Paulo, é um exemplo de dimensionamento redundante, no qual é possível identificar diversos caminhos alternativos para a redistribuição dos esforços caso ocorra a falha de uma de suas estaias.

Figura 2.9 - Ponte Octávio Frias de Oliveira



Fonte: WIKIPÉDIA (2013)

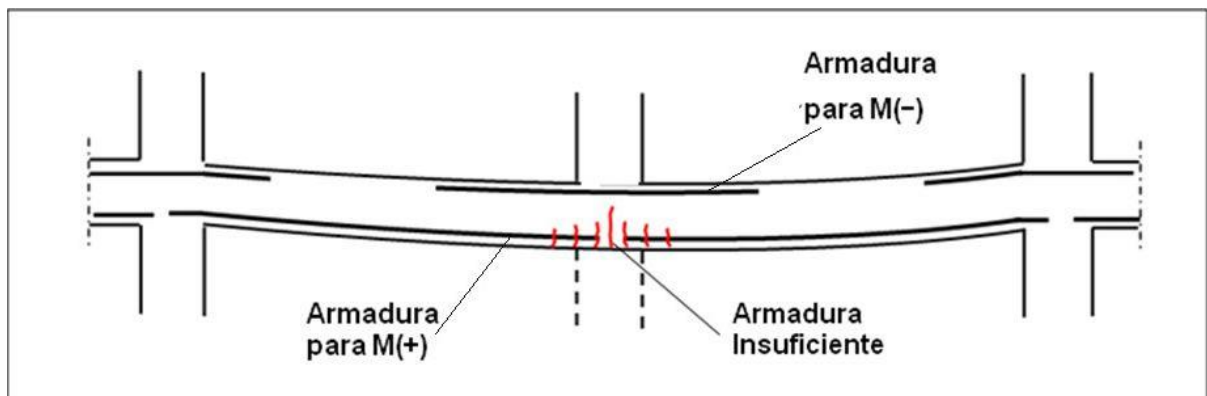
2.6.2 Ductilidade:

A ductilidade é caracterizada pela capacidade da estrutura em sofrer deformações antes de romper-se, ou seja, no caso da ocorrência do colapso, a estrutura tem a capacidade de suporte por um determinado tempo, no qual, supondo uma condição de ocupação do edifício, por exemplo, é possível que pessoas consigam sair do local em segurança (SANTOS, 2012).

Segundo Longo (2016), um elemento estrutural que possui ductilidade é aquele que apresenta em seu dimensionamento, por exemplo para vigas, uma armadura longitudinal contínua na parte inferior e um espaçamento menor entre os estribos na região próximo ao encontro dos pilares.

A Figura 2.10 exemplifica uma viga com armaduras longitudinais inferiores insuficientes conforme orienta Longo (2016), caracterizando assim, um elemento estrutural que não possui característica de ductilidade.

Figura 2.10 - Elemento estrutural que não possui características que previne o colapso progressivo



Fonte: LONGO (2016)

2.6.3 Continuidade:

A continuidade é caracterizada pela capacidade que uma estrutura tem em redistribuir de forma eficaz os esforços provenientes de uma falha local para os demais elementos estruturais constituintes, tais como pilares, vigas e lajes por meio da conectividade entre os elementos, ou seja, é uma característica correlata a característica de redundância. Portanto, um elemento estrutural caracterizado pela continuidade também é caracterizado como um elemento redundante (LARANJEIRAS, 2011).

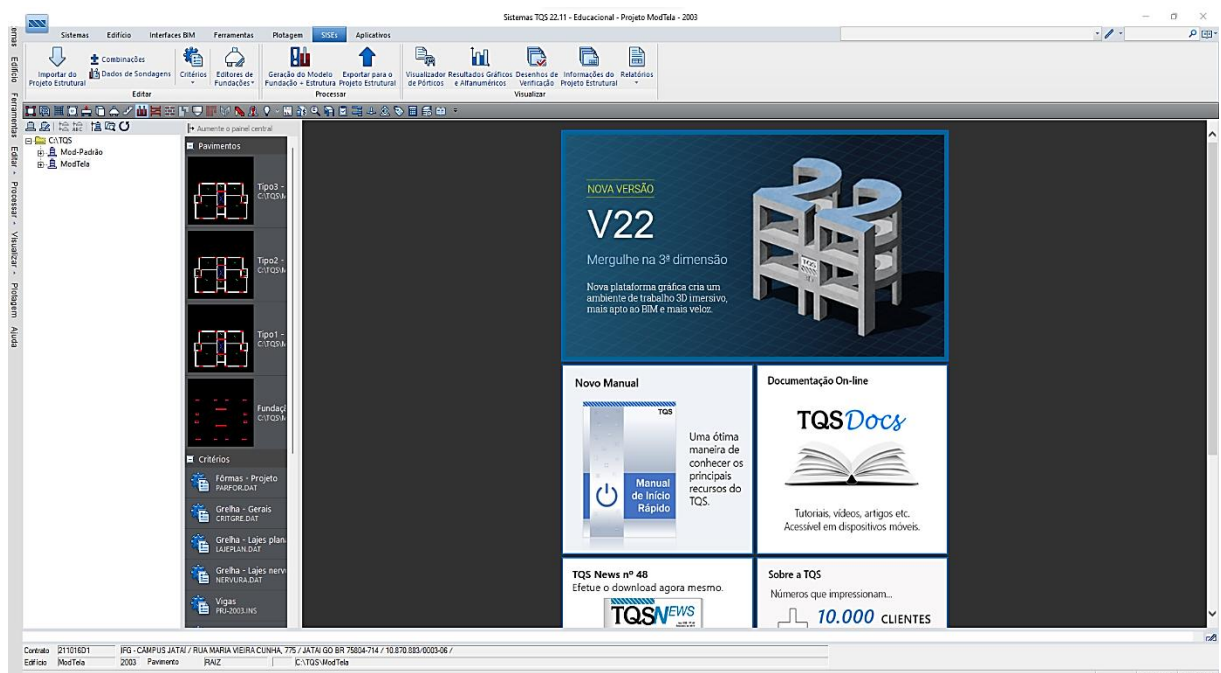
CAPÍTULO 3 METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido através do estudo de um edifício fictício modelado através do software CAD/TQS. A partir do edifício original, foram realizadas diversas modificações, criando exemplos de estudo com a finalidade de analisar a redistribuição de esforços em elementos estruturais, tais como vigas e pilares presentes em um edifício fictício em concreto armado, diante à possibilidade da ocorrência de colapso progressivo em detrimento da retirada de pilares predeterminados.

3.1 APRESENTAÇÃO DO SOFTWARE CAD/TQS

No presente trabalho foi utilizado o software CAD/TQS, versão 22.11.21 com licença pleno educacional cedida em parceria com a empresa TQS Informática Ltda para o desenvolvimento do estudo. É necessário destacar que o software CAD/TQS oferece diversos recursos para elaboração de projetos estruturais de edificações de forma totalmente integrada, automatizada e seguindo todos os critérios estabelecidos pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014) e outras versões anteriores para comparação. Estes recursos só são possíveis através de suas ferramentas direcionadas a execução de cálculos, modelagem, análise, dimensionamento e detalhamento de estruturas de concreto armado, protendido, pré-moldado e mais recentemente, alvenaria estrutural.

Figura 3.1 - Apresentação da interface do software CAD/TQS versão 22.11.21



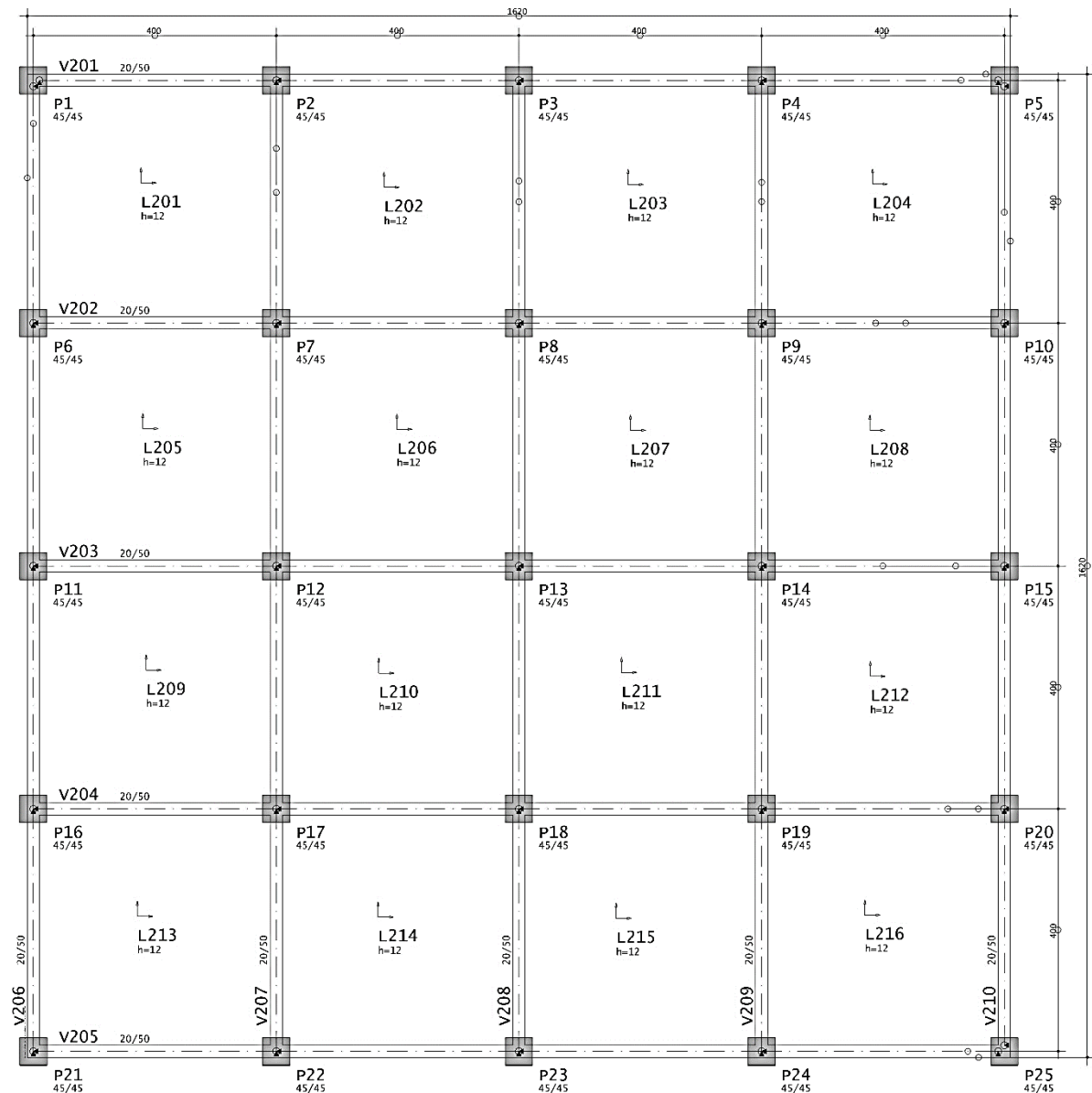
Fonte: AUTOR (2022)

3.2 APRESENTAÇÃO DO EDIFÍCIO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS

3.2.1 Disposição arquitetônica

Para execução deste trabalho, foi utilizado um edifício fictício com estrutura em concreto armado, sendo este, composto por 20 pavimentos tipos, sendo que cada pavimento possui uma área de 262,44 m² e o pé direito de 2,80 m. A Figura 3.2 ilustra a planta de forma do edifício fictício com alguns detalhes referentes ao tamanho dos pilares, vigas e lajes.

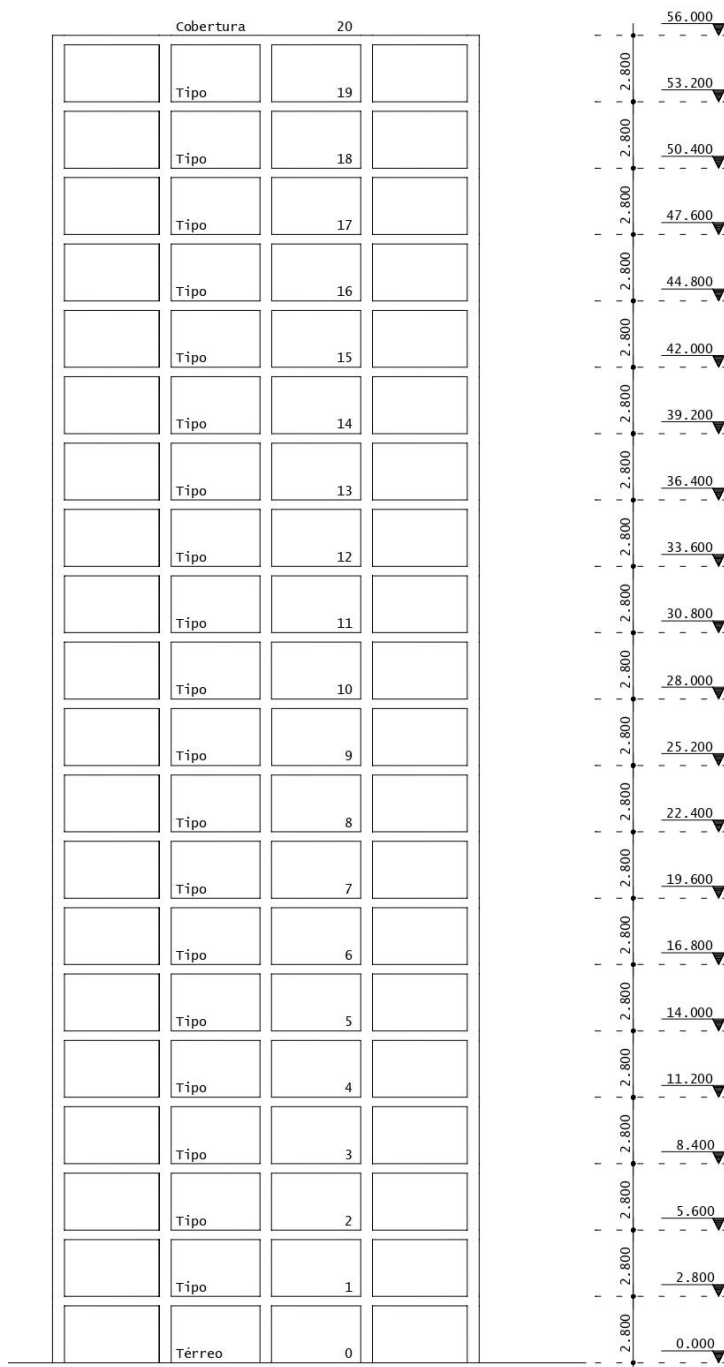
Figura 3.2 - Planta de forma do pavimento tipo
(sem escala e com dimensões apresentadas em centímetros).



Fonte: AUTOR (2022)

Já a Figura 3.3 ilustra o corte esquemático referente à disposição arquitetônica do edifício fictício original.

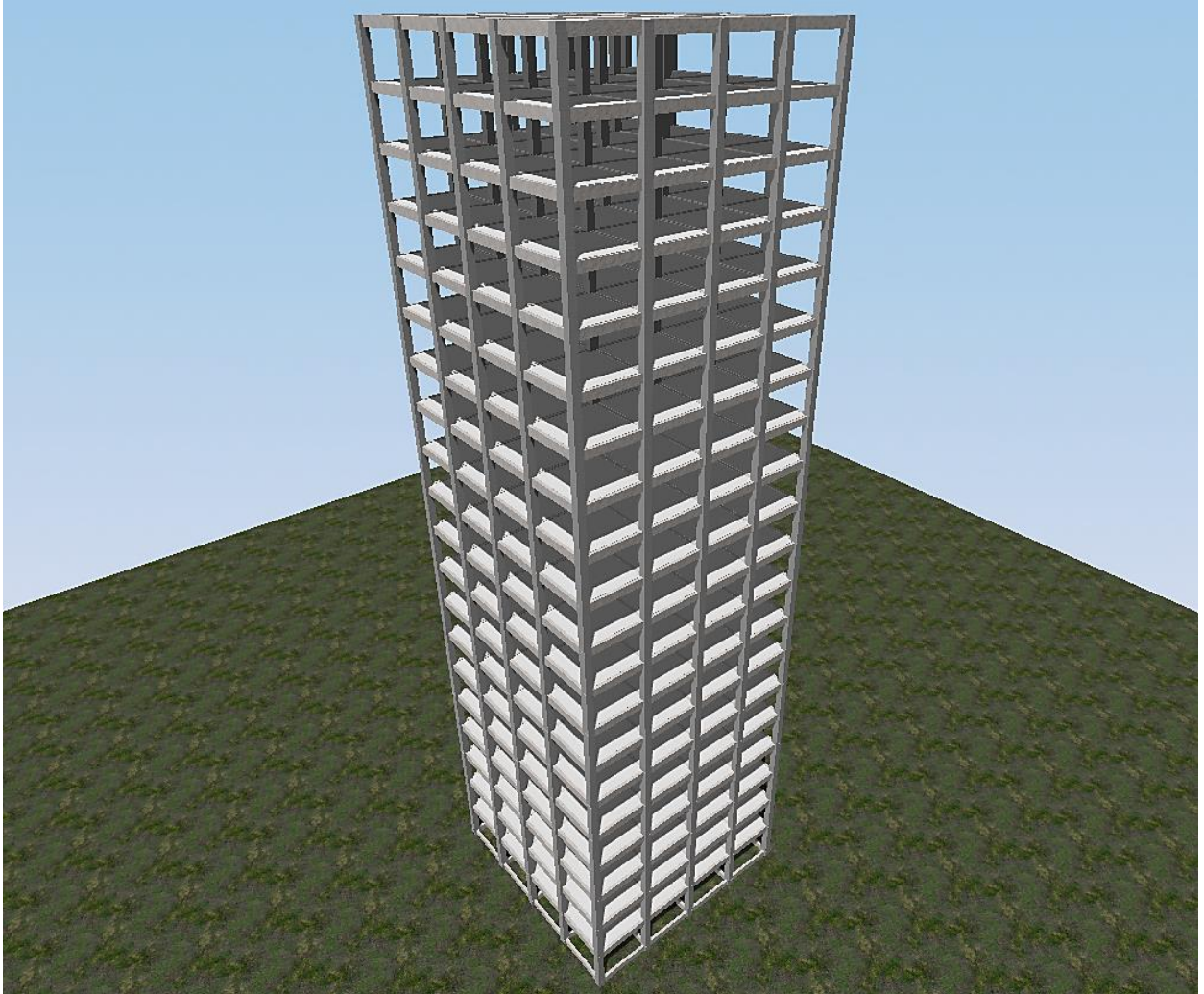
Figura 3.3 - Corte esquemático do edifício fictício (sem escala e com dimensões em metros).



Fonte: AUTOR (2022)

E por fim, a Figura 3.4 ilustra a visualização 3D do edifício fictício original que é resultado após a modelagem do edifício em 2D utilizando o software CAD/TQS.

Figura 3.4 - Visualização 3D da estrutura do edifício fictício em concreto armado.



Fonte: AUTOR (2022)

3.2.2 Elementos estruturais constituintes do edifício fictício

Os elementos estruturais que fazem parte do edifício fictício em concreto armado, que é objeto de estudo deste trabalho, possuem as seguintes características:

- Pilares em concreto armado com dimensões (hxb) = 45 x 45 cm;
- Vigas em concreto armado com dimensões (hxb) = 50 x 20 cm;
- Lajes maciças em concreto armado com dimensões (HL) = 12 cm.

3.2.3 Propriedades dos materiais utilizados

3.2.3.1 Concreto

O edifício fictício foi dimensionado utilizando o concreto C30, o qual este possui uma resistência característica $F_{ck} = 30$ MPa.

3.2.3.2 Armadura

Para o edifício fictício, foram utilizados dois tipos de aço para construção, o CA-50 que possui uma tensão de escoamento (f_{yd}) de 500 MPa e o aço CA-60 que possui uma tensão de escoamento (f_{yd}) de 600 MPa.

3.3 CARREGAMENTOS CONSIDERADOS

A seguir, serão apresentados os carregamentos considerados para o dimensionamento da estrutura do edifício fictício que foram obtidos através da NBR 6120 (ABNT, 2019) e da NBR 6123 (ABNT, 1988), sendo necessário ressaltar que, o software CAD/TQS realiza os cálculos conforme orientado pelo projetista que os manipula na parte inicial das configurações.

3.3.1 Carregamentos verticais

Os carregamentos verticais considerados para o dimensionamento da estrutura foram:

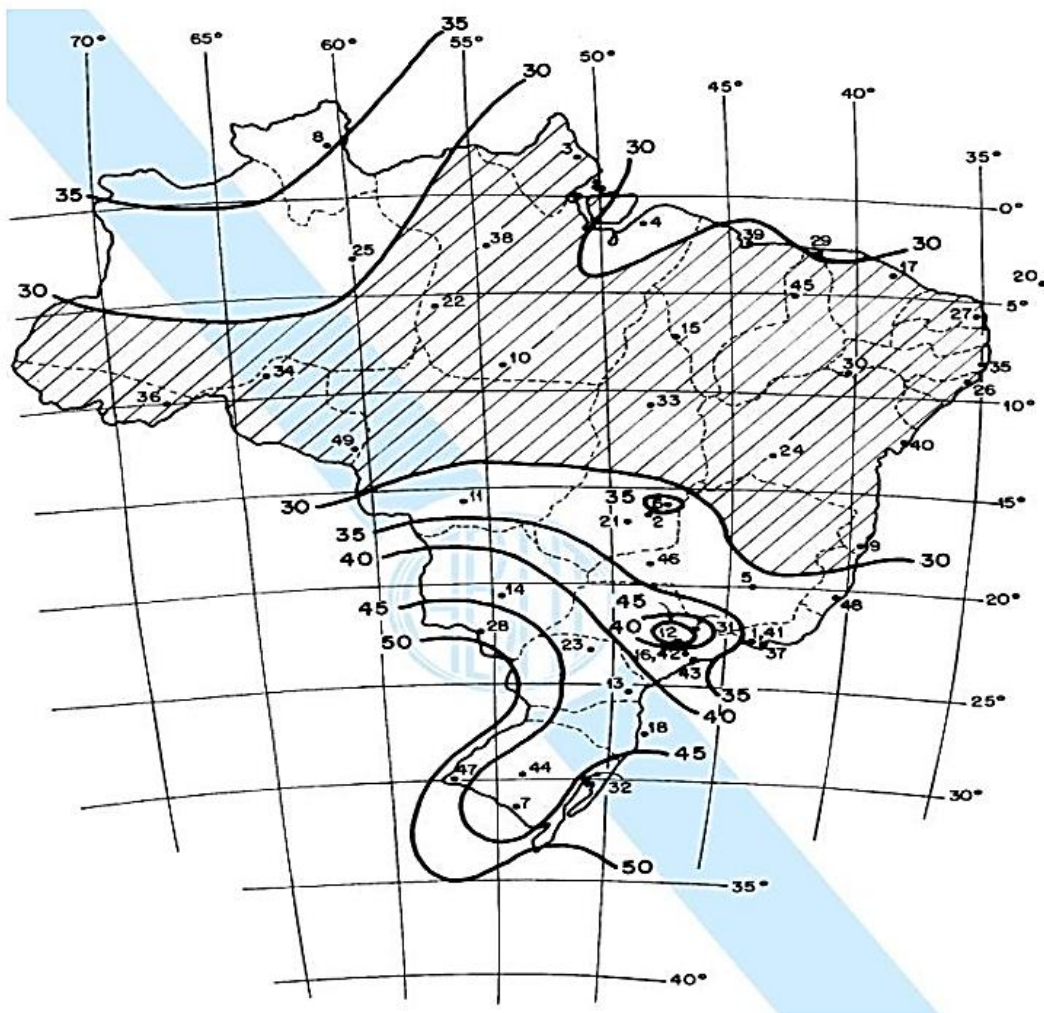
- **Peso próprio dos elementos estruturais em concreto armado:** através dos parâmetros normativos da NBR 6120 (ANBT, 2019), a carga permanente considerada e consequentemente adotada no software CAD/TQS foi o peso específico do concreto igual a 25 kN/m³.
- **Peso próprio dos elementos de vedação:** utilizando os parâmetros normativos da NBR 6120 (ANBT, 2019), a carga permanente considerada e consequentemente adotada no software CAD/TQS foi o peso específico igual a 12 kN/m³, sendo os blocos cerâmicos com espessura igual a 19 cm e pé direito de 2,30 m.
- **Considerações da sobrecarga:** utilizando os parâmetros normativos da NBR 6120 (ANBT, 2019) para edifícios residenciais, a carga acidental considerada

e conseqüentemente adotada no software CAD/TQS foi $1,5 \text{ kN/m}^2$ em todo pavimento.

3.3.2 Carregamentos horizontais

Para este trabalho, o vento foi considerado como uma carga accidental atuante através de um carregamento horizontal, seguindo as orientações prescritas na NBR 6123 (ABNT, 1988). O mapa das isopletas conforme ilustrado na Figura 3.5 abaixo, é usado como parâmetro para se determinar o valor dessa carga accidental, o qual varia de acordo com as regiões do Brasil.

Figura 3.5 - Mapa de isopletas



Fonte: NBR 6123 (ABNT, 1988)

Se faz importante ressaltar, que o software CAD/TQS considera a ação do vento quando informado alguns parâmetros, gerando assim o carregamento da ação do vento na estrutura automaticamente.

A Tabela 3.1 apresenta as considerações para utilização no software para modelagem do edifício objeto de estudo.

Tabela 3.1 - Dados e parâmetros considerados para o cálculo da carga do vento na estrutura

PARÂMETRO	DESCRIÇÃO	VALORES UTILIZADOS	CONSIDERAÇÕES
V0	Velocidade básica do vento	37 m/s	Jataí - GO
S1	Fator do terreno	1,00	Terreno Plano
S2	Categoria de rugosidade	IV	Terrenos com obstáculos numerosos e pouco espaçados
S2'	Classe da edificação	Classe C	Maior dimensão horizontal ou vertical > 50 m
S3	Fator estatístico	1,00	Edificações em geral

Fonte: AUTOR (2022)

Já a Tabela 3.2 apresentam os resultados obtidos referente ao coeficiente de arrasto utilizado pelo software para modelagem do edifício objeto de estudo.

Tabela 3.2 - Resultados obtidos após utilização do software

ÂNGULO	COEFICIENTE DE ARRASTO	ÁREA (m²)	PRESSÃO (kN/m²)
90°	1,34	921,20	0,92
270°	1,34	921,20	0,92
0°	1,34	921,20	0,92
180°	1,34	921,20	0,92

Fonte: AUTOR (2022)

3.3.3 Combinações de ações

Todas as combinações referentes ao estado limite último ELU e estado limite de serviço ELS, utilizadas para análise global do edifício fictício presente neste trabalho, estão dispostas nas Tabela 3.3 e Tabela 3.4 abaixo:

Tabela 3.3 - Resumo das combinações no modelo global

Tipo	Descrição	N. Combinações
ELU1	Verificações de estado limite último - Vigas e lajes	18
ELU2	Verificações de estado limite último - Pilares e fundações	18
FOGO	Verificações em situação de incêndio	2
ELS	Verificações de estado limite de serviço	12
COMBFLU	Cálculo de fluência (método geral)	2
LAJEPRO	Combinações p/ flechas em lajes protendidas	0

Fonte: AUTOR (2022)

Tabela 3.4 - Combinações geradas pelo software CAD/TQS para o modelo global do edifício fictício

GRUPO DE COMBINAÇÕES	AÇÕES CONSIDERADAS
ELU1	PERMACID/PP+PERM+ACID
ELU1	ACIDCOMB/PP+PERM+ACID+0.6VENT1
ELU1	ACIDCOMB/PP+PERM+ACID+0.6VENT2
ELU1	ACIDCOMB/PP+PERM+ACID+0.6VENT3
ELU1	ACIDCOMB/PP+PERM+ACID+0.6VENT4
ELU1	ACIDCOMB/PP+PERM+0.5ACID+VENT1
ELU1	ACIDCOMB/PP+PERM+0.5ACID+VENT2
ELU1	ACIDCOMB/PP+PERM+0.5ACID+VENT3
ELU1	ACIDCOMB/PP+PERM+0.5ACID+VENT4
FOGO	PERMVAR/PP+PERM+0.3ACID
ELS	CFREQ/PP+PERM+0.4ACID
ELS	CFREQ/PP+PERM+0.3ACID+0.3VENT1
ELS	CFREQ/PP+PERM+0.3ACID+0.3VENT2
ELS	CFREQ/PP+PERM+0.3ACID+0.3VENT3

ELS	$CFREQ/PP+PERM+0.3ACID+0.3VENT4$
ELS	$CQPERM/PP+PERM+0.3ACID$
COMBFLU	$COMBFLU/PP+PERM+0.3ACID$
ELU1	$PERMACID/PP_V+PERM_V+ACID_V$
ELU1	$ACIDCOMB/PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT1$
ELU1	$ACIDCOMB/PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT2$
ELU1	$ACIDCOMB/PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT3$
ELU1	$ACIDCOMB/PP_V+PERM_V+ACID_V+0.6VENT4$
ELU1	$ACIDCOMB/PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT1$
ELU1	$ACIDCOMB/PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT2$
ELU1	$ACIDCOMB/PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT3$
ELU1	$ACIDCOMB/PP_V+PERM_V+0.5ACID_V+VENT4$
FOGO	$PERMVAR/PP_V+PERM_V+0.3ACID_V$
ELS	$CFREQ/PP_V+PERM_V+0.4ACID_V$

Fonte: AUTOR (2022)

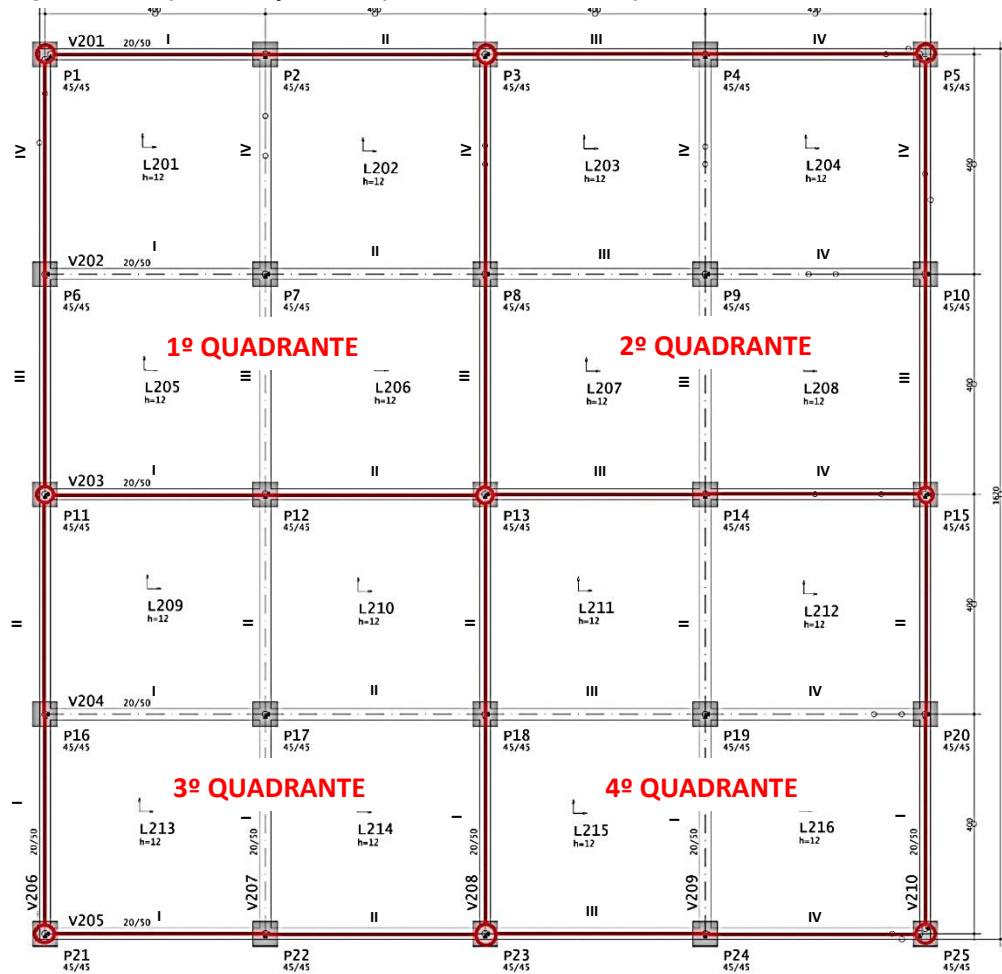
É importante ressaltar que o software CAD/TQS possui todas as combinações no estado limite último (ELU) e no estado limite de serviço (ELS) necessárias e que é possível adicionar ou remover outras combinações caso seja de interesse do projetista estrutural.

3.4 APRESENTAÇÃO DOS EXEMPLOS REFERENTE AO ESTUDO

Para a formulação dos exemplos presentes neste estudo, foram realizadas algumas modificações com a finalidade de obter uma análise dos efeitos provenientes dessas alterações e da capacidade dos elementos estruturais constituintes do edifício fictício em resistirem mediante a possibilidade da ocorrência de colapso progressivo.

Para isso, foram realizadas a retirada de pilares predeterminados, sendo estes denominados pilar de canto, pilar de borda e pilar de centro. Portanto, os exemplos deste trabalho estão limitados apenas ao 1º quadrante do edifício fictício, devido a sua simetria como apresentado na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Apresentação dos quadrantes formados pela simetria do edifício fictício



Fonte: AUTOR (2022)

A seguir na Tabela 3.5 é apresentada a formulação dos exemplos que serão abordados neste trabalho, bem como as particularidades de cada um. Se faz importante ressaltar que a quantidade de pavimento não foi alterada neste estudo, pois segundo Souza (2021), a quantidade de pavimentos não influencia no padrão da redistribuição dos esforços.

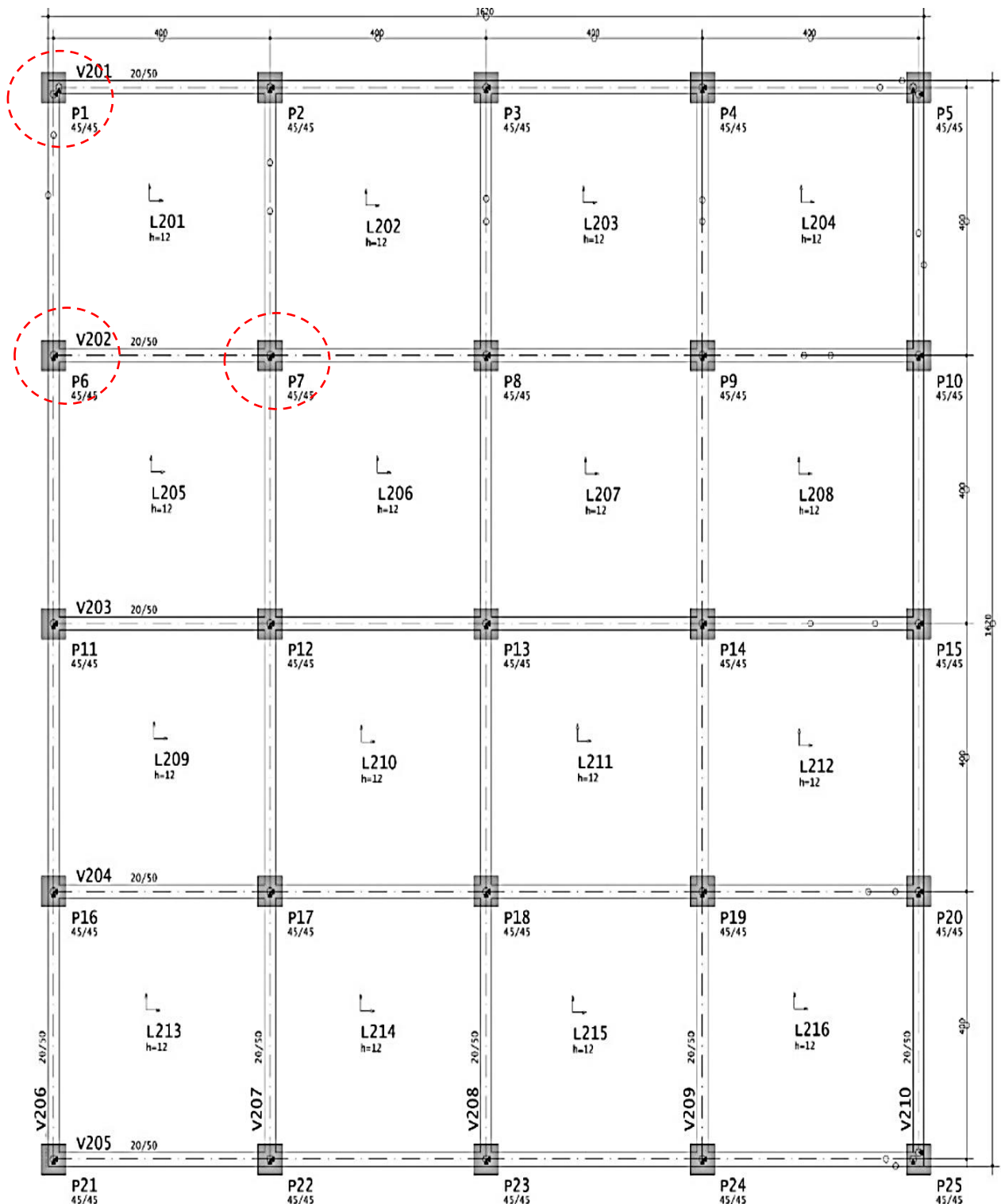
Tabela 3.5 - Resumo dos exemplos abordados no trabalho

EXEMPLOS	PILARES REMOVIDOS	LOCAL DA REMOÇÃO
Exemplo 1	Original	Não há
Exemplo 2	P1	Térreo
Exemplo 3	P6	Térreo
Exemplo 4	P7	Térreo

Fonte: AUTOR (2022)

A escolha para remoção dos pilares P1, P6 e P7 tem por finalidade avaliar se a posição do pilar removido influencia na redistribuição dos esforços da estrutura, sendo que os pilares citados anteriormente são caracterizados, respectivamente como, pilar de canto, pilar de borda e pilar de centro conforme ilustrado na Figura 3.7.

Figura 3.7 - Posição dos pilares removidos (sem escala, dimensões em centímetros)



Fonte: AUTOR (2022)

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

4.1 EXEMPLO 1: EDIFÍCIO FICTÍCIO ORIGINAL

A estrutura apresentada no exemplo 1 é considerada como a estrutura original deste trabalho, na qual suas particularidades seguem todas as características apresentadas no tópico 3.2 e tópico 3.3. É necessário ressaltar que essa estrutura foi analisada e dimensionada sem nenhuma remoção de pilar.

Portanto, a seguir estão apresentados os resultados obtidos após análise dos elementos estruturais constituinte deste edifício, sendo estes pilares e vigas.

4.1.1 Esforços obtidos após análise: Pilares

Após o processamento global do exemplo pelo software CAD/TQS, são apresentados na Tabela 4.1 os maiores valores de esforço normal, obtidos através das diferentes combinações simuladas pelo software em cada pilar localizado no pavimento térreo. Posteriormente, por meio destes valores, será possível avaliar de que forma acontece a redistribuição dos esforços em vigas e pilares quando retirados os pilares predeterminados nos próximos exemplos.

É possível observar que os pilares mais solicitados da estrutura são os pilares de centro, P7, P8, P9, P12, P13, P14, P17, P18, e P19, com carregamentos que vão de 3.468,740 kN a 3.560,301 kN. Posteriormente, ainda seguindo em ordem decrescente de carregamentos, temos os pilares de borda P2, P3, P4, P6, P10, P11, P15, P16, P20, P22, P23 e P24 com carregamentos que variam entre 2.186,091 kN a 2.245,808 kN. Por fim os pilares menos solicitados são os pilares de canto P1, P5, P21 e P25 com esforços normais com valores entre 1.395,174 kN a 1.412,199 kN.

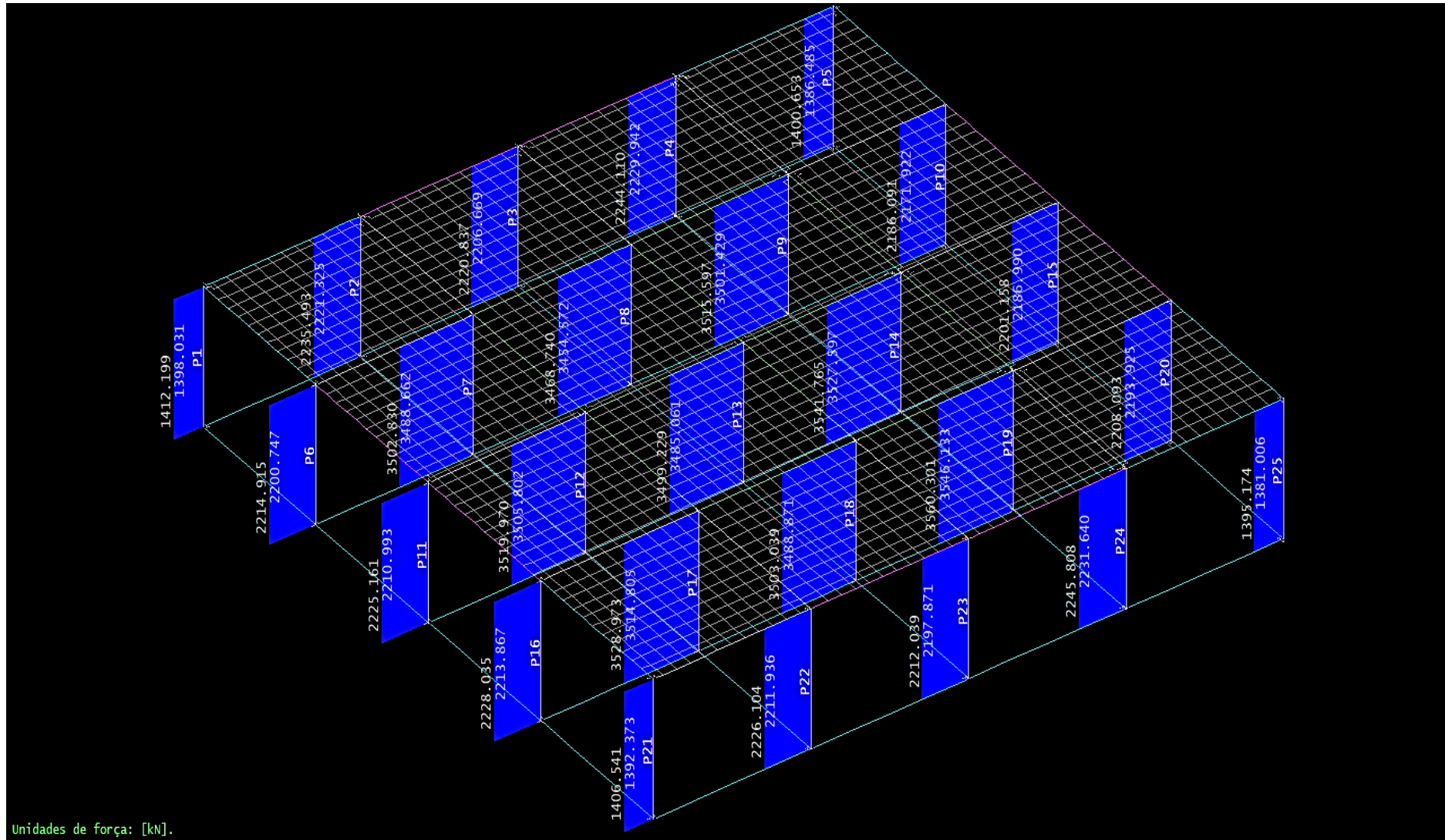
Na Figura 4.1 é apresentada a ilustração do pórtico espacial que contém os valores dos esforços normais calculados pelo software CAD/TQS para o edifício fictício original nos pilares do pavimento térreo.

Tabela 4.1 - Maiores valores obtidos em relação ao esforço normal em pilares localizados no térreo

PILARES	ESFORÇO NORMAL (kN)	DENOMINAÇÃO DOS PILARES	INTENSIDADE
P1	1412,20	Canto	
P2	2235,50	Borda	
P3	2220,80	Borda	
P4	2244,10	Borda	
P5	1400,70	Canto	
P6	2214,90	Borda	
P7	3502,80	Centro	
P8	3468,70	Centro	
P9	3515,60	Centro	
P10	2186,10	Borda	
P11	2225,20	Borda	
P12	3520,00	Centro	
P13	3499,20	Centro	
P14	3541,80	Centro	
P15	2201,20	Borda	
P16	2228,00	Borda	
P17	3529,00	Centro	
P18	3503,00	Centro	
P19	3560,03	Centro	
P20	2208,10	Borda	
P21	1406,50	Canto	
P22	2226,10	Borda	
P23	2212,00	Borda	
P24	2245,80	Borda	
P25	1395,20	Canto	
Legenda:			
Variação de Esforço Normal entre: 1.395,20 a 1.412,20 kN			
Variação de Esforço Normal entre: 2.186,10 a 2.245,80 kN			
Variação de Esforço Normal entre: 3.468,70 a 3.560,03 kN			

Fonte: AUTOR (2022)

Figura 4.1 - Ilustração dos esforços normais nos pilares do pavimento térreo



Fonte: AUTOR (2022)

4.1.2 Esforços obtidos após análise: Vigas

De forma análoga aos pilares, após o processamento global do exemplo pelo software CAD/TQS, são apresentados na Tabela 4.2 os maiores valores de momento fletor positivo e momento fletor negativo obtidos através das diferentes combinações simuladas pelo software em cada viga localizada no pavimento térreo. Posteriormente, por meio destes valores, foi possível avaliar de que forma acontece a redistribuição dos esforços quando retirados os pilares predeterminados.

Tabela 4.2 - Valores obtidos referentes ao momento fletor característico de solicitação M_{SK}

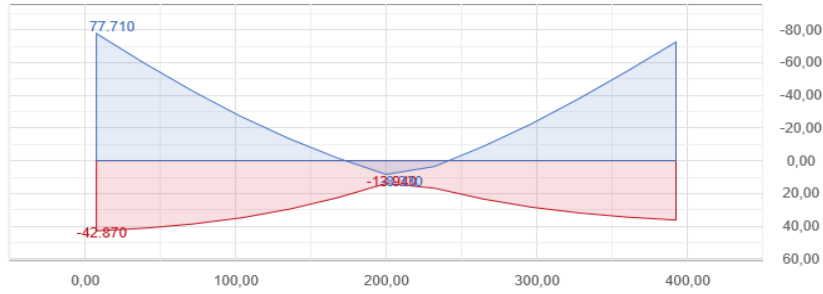
VIGAS	VÃO	MOMENTO FLETOR POSITIVO À ESQUERDA M_{SK} (kN.m)	MOMENTO FLETOR POSITIVO MEIO DO VÃO M_{SK} (kN.m)	MOMENTO FLETOR POSITIVO À DIREITA M_{SK} (kN.m)
V201	I	77.710	42.870	72.600
	II	68.140	32.260	30.165
	III	68.260	21.623	67.490
	IV	72.250	22.186	77.320
V202	I	96.090	43.420	89.960
	II	83.670	30.700	83.460
	III	83.330	31.030	81.890
	IV	89.380	43.620	96.360
V203	I	96.050	43.310	90.070
	II	83.880	23.489	83.770
	III	83.490	30.960	82.390
	IV	89.300	43.510	96.360
V204	I	96.690	43.430	90.550
	II	84.140	30.710	83.710
	III	83.650	31.040	82.580
	IV	89.760	42.700	45.946
V205	I	78.570	42.920	73.450
	II	68.700	32.790	68.710
	III	68.710	32.970	67.600
	IV	73.130	43.050	78.480
V206	I	78.870	42.720	73.800
	II	68.930	32.800	68.890
	III	68.470	32.940	68.780

	IV	73.590	43.150	78.100
V207	I	97.110	43.010	90.880
	II	83.870	31.200	83.380
	III	82.860	31.050	83.630
	IV	90.390	43.240	95.500
V208	I	96.720	43.020	90.410
	II	83.620	31.240	83.170
	III	82.800	31.080	83.470
	IV	90.050	43.230	95.090
V209	I	96.070	42.890	89.900
	II	83.200	31.250	82.660
	III	82.300	31.130	82.960
	IV	89.560	43.050	94.630
V210	I	78.240	42.860	73.210
	II	68.380	33.070	68.350
	III	68.200	33.060	68.300
	IV	73.090	43.340	76.970

Fonte: AUTOR (2022)

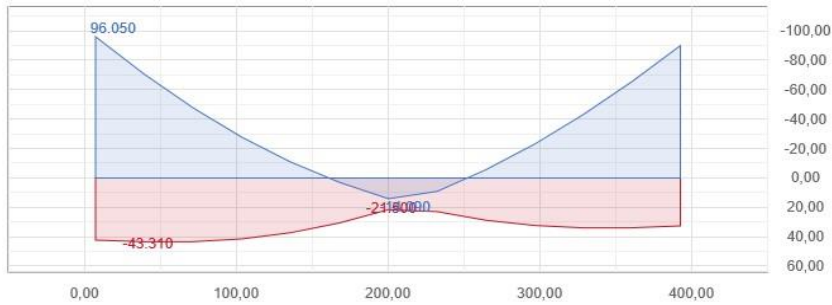
As Figuras 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam as ilustrações referentes as envoltórias de momento fletor com os valores característicos de solicitação (M_{SK}) para os trechos I das vigas V201, V202, V203 e trecho IV das vigas V206, V207 e V208 dimensionadas pelo software CAD/TQS, no qual o conjunto associado dessas vigas caracterizam o 1º quadrante, que serão utilizadas como objeto comparativo para os demais exemplos deste trabalho.

Figura 4.2 - Envoltória de momento fletor característico de solicitação para a viga V201 referente ao vão I



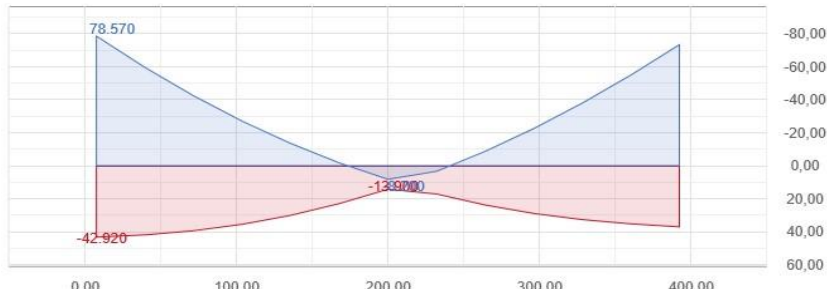
Fonte: AUTOR (2022)

Figura 4.6 - Envoltória de momento fletor característico de solicitação para a viga V203 referente ao vão I



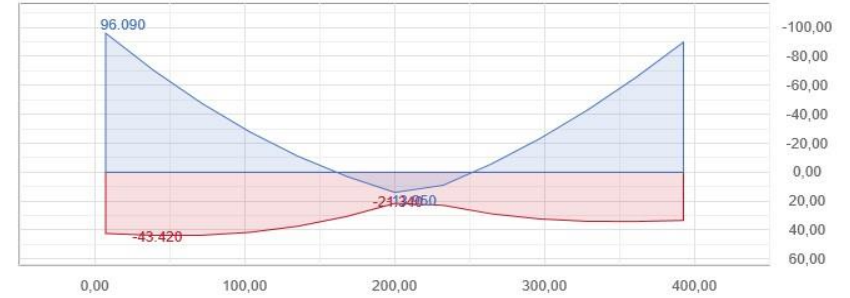
Fonte: AUTOR (2022)

Figura 4.7 - Envoltória de momento fletor característico de solicitação para a viga V205 referente ao vão I



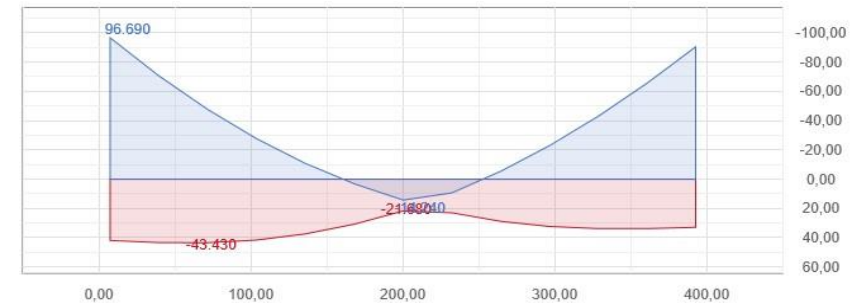
Fonte: AUTOR (2022)

Figura 4.3 - Envoltória de momento fletor característico de solicitação para a viga V202 referente ao vão I



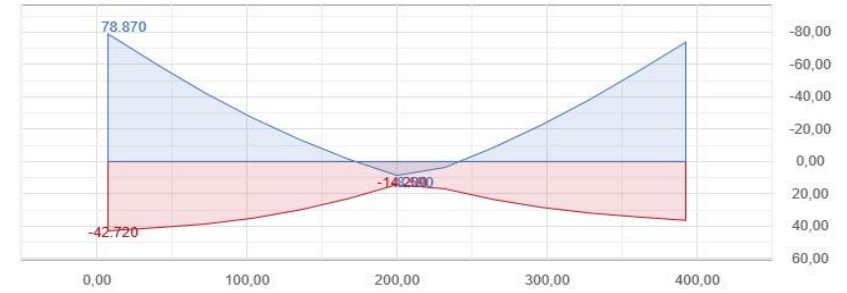
Fonte: AUTOR (2022)

Figura 4.5 - Envoltória de momento fletor característico de solicitação para a viga V204 referente ao vão I



Fonte: AUTOR (2022)

Figura 4.4 - Envoltória de momento fletor característico de solicitação para a viga V206 referente ao vão I

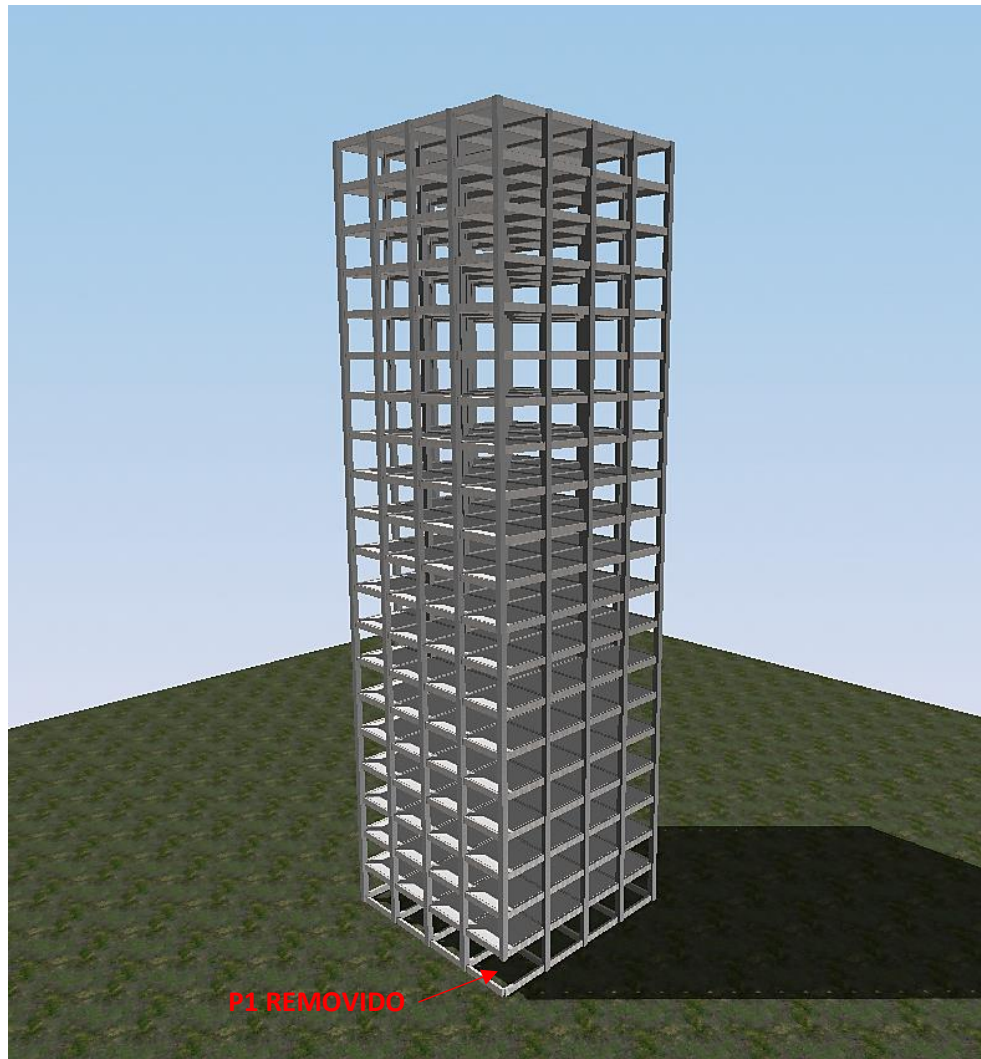


Fonte: AUTOR (2022)

4.2 EXEMPLO 2: REMOÇÃO DO PILAR P1 – PILAR DE CANTO

Nesse exemplo, o modelo do edifício fictício possui as mesmas características arquitetônicas e construtivas do exemplo original, com exceção do pilar de canto P1, que foi removido apenas do pavimento térreo, conforme ilustrado na Figura 4.8.

Figura 4.8 - Ilustração do edifício fictício de 20 pavimentos em modelagem 3D após a remoção do pilar P1 no térreo



Fonte: AUTOR (2022)

Figura 4.9 - Ilustração dos esforço normal nos pilares do Exemplo 2 com as respectivas variações

Fonte: AUTOR (2022)

4.2.1 Redistribuição dos esforços em: Pilares

Após a remoção do pilar P1, o edifício fictício de 20 pavimentos foi novamente processado junto ao software CAD/TQS, no qual resultou em um novo relatório de

esforços normais nos pilares, conforme exposto na Tabela 4.3 a seguir, apenas para o 1º quadrante.

Tabela 4.3 - Comparativo entre o exemplo 1 e exemplo 2 após remoção do pilar P1

PILARES	EXEMPLO 1: MODELO ORIGINAL (kN)	EXEMPLO 2: P1 REMOVIDO (kN)	VARIAÇÃO DO ESFORÇO APÓS REDISTRIBUIÇÃO
P1	1412,20	-	-
P2	2235,50	3115,60	39,37%
P3	2220,80	2096,60	-5,59%
P6	2214,90	3093,90	39,69%
P7	3502,80	3543,80	1,17%
P8	3468,70	3457,80	-0,31%
P11	2225,20	2100,30	-5,61%
P12	3520,00	3508,60	-0,32%
P13	3499,20	3500,00	0,02%

Fonte: AUTOR (2022)

A Figura 4.10 - Ilustração dos esforço normal nos pilares do Exemplo 2 com as respectivas variações

Figura 4.11 ilustra a redistribuição dos esforços normais em cada pilar do pavimento térreo referente ao 1º quadrante após remoção do P1 juntamente com as porcentagens de variação desses esforços em comparação com o Exemplo 1. A cor verde, indica o aumento dos valores de esforço normal, enquanto os valores

Figura 4.10 - Ilustração dos esforço normal nos pilares do Exemplo 2 com as respectivas variações apresentados na cor azul, indicam uma redução.

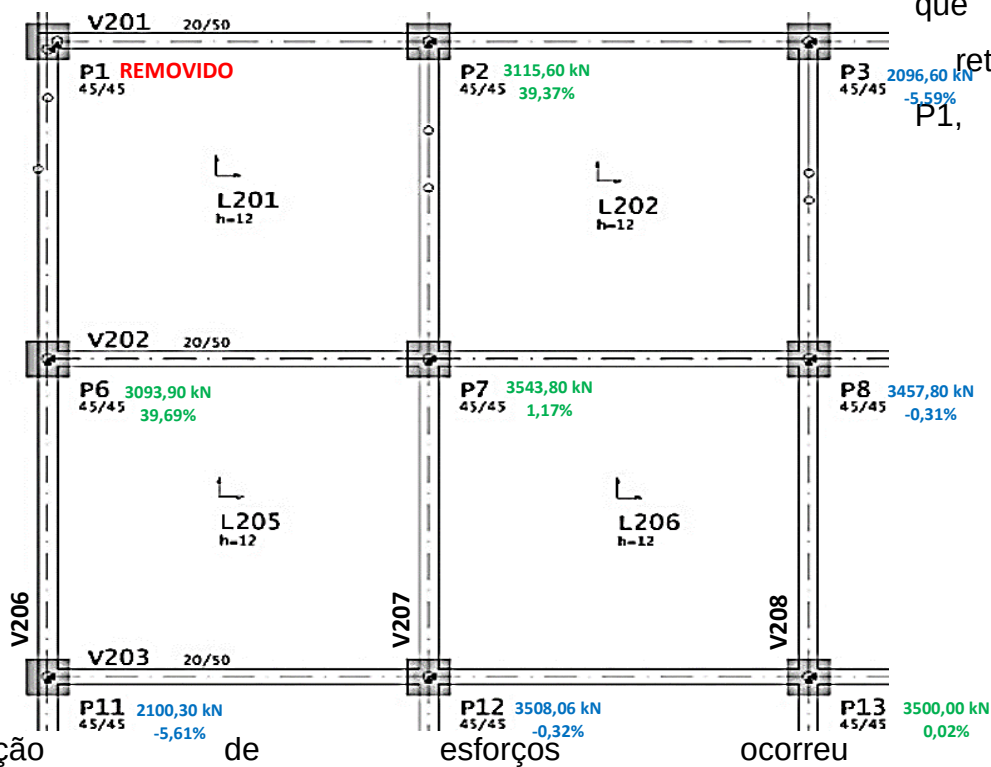
Analisando
resultados

Fonte: AUTOR (2022)

os

Fonte: AUTOR (2022)
apresentados na Figura 4.10 - Ilustração dos esforço normal nos pilares do Exemplo 2 com as respectivas variações

Figura 4.11 e Tabela 4.3, é possível verificar a redistribuição de esforços que após a retirada do pilar P1, a



redistribuição

de

esforços

ocorreu

de

forma preponderantemente nos pilares próximos, sendo que os pilares P2, P6 e P7, tiveram incrementos de carga conforme apresentado. O pilar P13 teve um acréscimo de carga, no valor de 0,02%. Os demais pilares constituintes do 1º quadrante apresentaram redução em seus valores de esforço normal, sendo os pilares P3, P8, P11 e P12 com os valores de redução de, 5,59%, 0,31%, 5,61% e 0,32%, respectivamente.

Assim, se faz importante ressaltar as particularidades referentes ao Exemplo 2 após remover o pilar P1, no qual analisando o pilar P6 e comparando o referido pilar na situação original, exemplificada pelo Figura 4.13 – Seção transversal do pilar P6
(a) Situação original; (b) Após retirada do pilar P1

Figura 4.14a, é possível observar que em sua seção transversal o referido apresenta um quantitativo de área de aço e já para a situação do Exemplo 2, exemplificada pelo Figura 4.13 – Seção transversal do pilar P6

(a) Situação original; (b) Após retirada do pilar P1

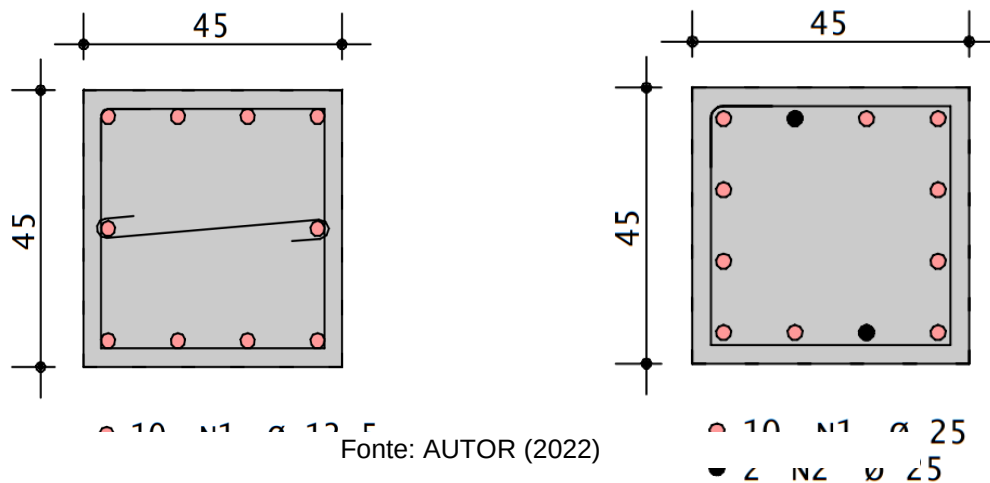
Figura 4.14b é acrescentado uma taxa de área de aço, com alteração no quantitativo

Figura 4.13 – Seção transversal do pilar P6
(a) Situação original; (b) Após retirada do pilar P1

bem como no diâmetro do aço. Podendo então caracterizar que o pilar P6 não conseguiria resistir após a redistribuição dos esforços em detrimento da retirada do

a) pilar P1.

b)



4.2.2 Redistribuição dos esforços em: Vigas

Após a remoção do pilar P1, os valores referentes ao momento fletor nas vigas que constituem o 1º quadrante resultaram conforme expostos na Tabela 4.4. É possível observar que as vigas V201 e V206, em seu trecho I e trecho IV, respectivamente, apresentaram consideráveis acréscimos de esforço de momento fletor. Com a remoção do pilar, o encontro destes trechos é caracterizado como uma viga sendo apoiada sobre outra viga. A Figura 4.161 – Ilustração do encontro entre as vigas V201 e V206

Figura 4.171 ilustra essa situação.

Figura 4.161 – Ilustração do encontro entre as vigas V201 e V206

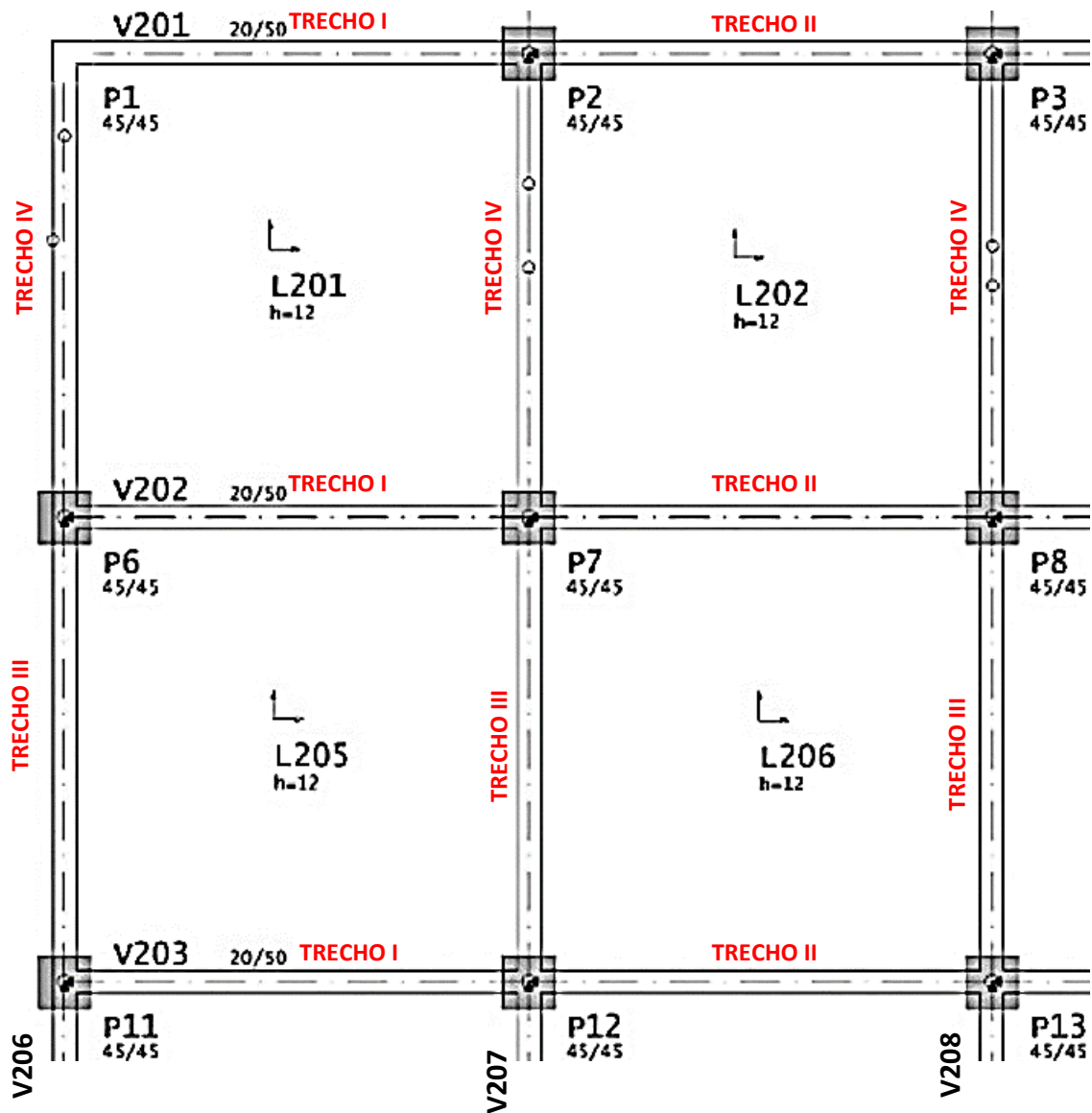


Tabela 4.4 - Comparativo entre os valores obtidos de momento fletor característico de solicitação M_{sk} entre o Exemplo 1 e Exemplo 2

VIGAS	VÃO	MOMENTO FLETOR À ESQUERDA M_{SK} (kN.m)	VARIAÇÃO EM COMPARAÇÃO AO EXEMPLO 1	MOMENTO FLETOR MEIO DO VÃO M_{SK} (kN.m)	VARIAÇÃO EM COMPARAÇÃO AO EXEMPLO 1	MOMENTO FLETOR À DIREITA M_{SK} (kN.m)	VARIAÇÃO EM COMPARAÇÃO AO EXEMPLO 1
V201	I	-	-	-	-	379.800	<u>423%</u>
	II	307.330	351%	103.040	219%	50.230	67%
V202	I	87.070	-9%	35.980	-17%	79.530	-12%
	II	77.230	-8%	26.990	-12%	70.790	-14%
V203	I	87.070	-3%	35.980	-17%	79.530	-12%
	II	77.240	-8%	27.180	0%	71.090	-15%
V206	III	50.470	-26%	103.730	215%	307.600	<u>347%</u>
	IV	380.390	<u>417%</u>	-	-	--	
V207	III	70.250	-15%	27.010	-13%	77.060	-8%
	IV	79.820	-12%	36.030	-17%	85.380	-11%
V208	III	70.130	-15%	27.070	-13%	76.720	-8%
	IV	79.380	-12%	35.930	-17%	86.250	-9%

Fonte: AUTOR (2022)

É importante ressaltar as particularidades referentes ao Exemplo 2 quando se remove o pilar P1, no qual analisando a viga V201 em seu trecho I na situação original, exemplificada pelo Figura 4.19 -

Seção transversal da viga V201

- (a) Situação original caracterizando uma viga contínua;
- (b) Após retirada do pilar P1 caracterizando como viga em balanço.

Figura 4.20a, é possível observar em sua seção transversal um quantitativo de área de aço e já para a situação do Exemplo 2, exemplificada pelo Figura 4.19 - Seção transversal da viga V201

- (a) Situação original caracterizando uma viga contínua;
- (b) Após retirada do pilar P1 caracterizando como viga em balanço.

Figura 4.19 - Seção transversal da viga V201

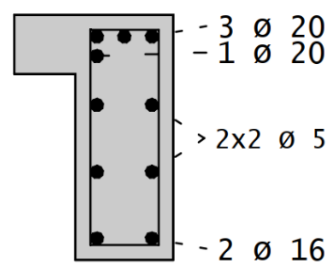
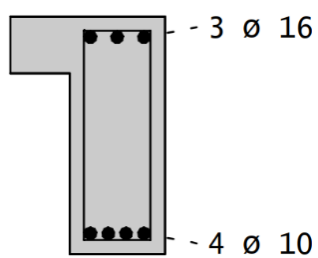
- (a) Situação original caracterizando uma viga contínua;
- (b) Após retirada do pilar P1 caracterizando como viga em balanço.

Figura 4.20b é acrescentado uma taxa de área de aço, com alteração no quantitativo bem como no diâmetro do aço. Podendo então caracterizar que a viga V201 em seu trecho I não conseguiria resistir após a redistribuição dos esforços em detrimento da retirada do pilar P1.

a)

b)

Fonte: AUTOR (2022)

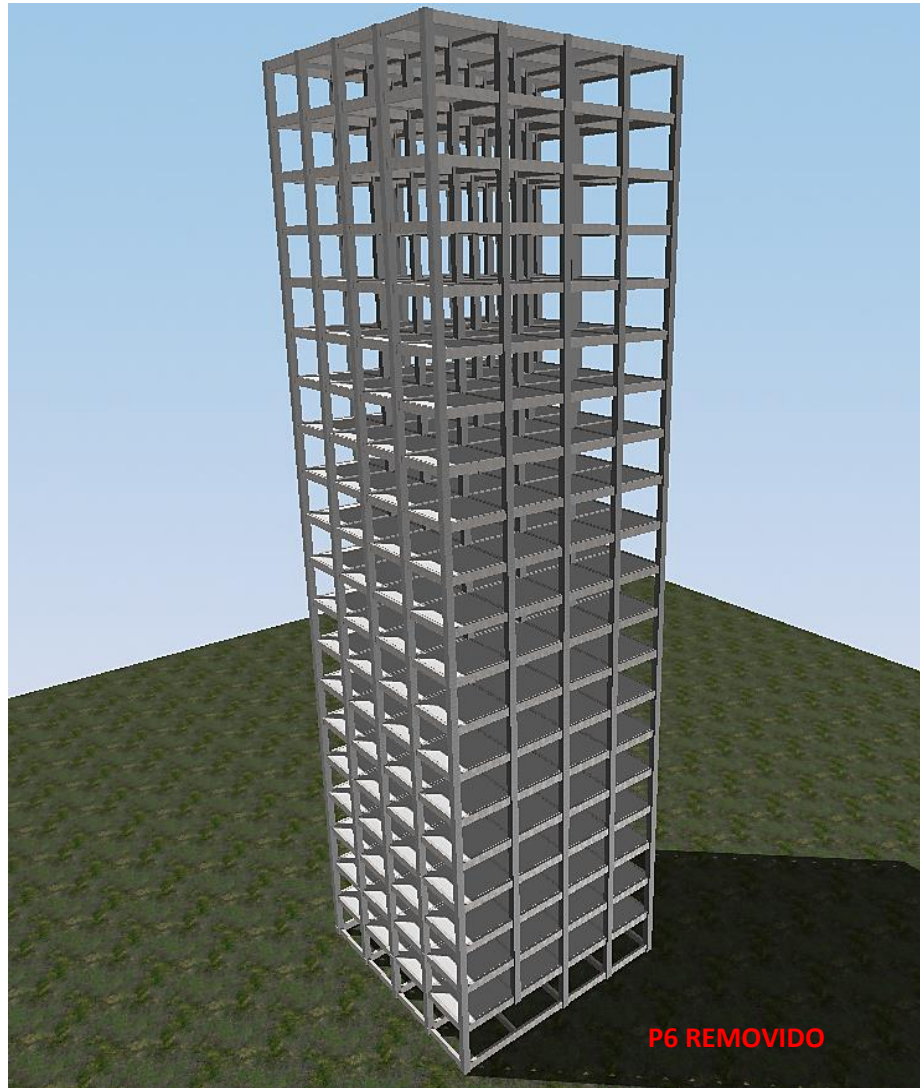


4.3 EXEMPLO 3: REMOÇÃO DO PILAR P6 – PILAR DE BORDA

O exemplo 3 aborda a remoção do pilar de borda P6 no pavimento térreo, sendo que este exemplo possui as mesmas características arquitetônicas e construtivas do exemplo original. A Figura 4.22 - Ilustração do edifício fictício de 20 pavimentos em modelagem 3D após a remoção do pilar P6 no térreo

Figura 4.22 - Ilustração do edifício fictício de 20 pavimentos em modelagem 3D após a remoção do pilar P6 no térreo

Figura
ilustra a



4.23

disposição arquitetônica do referido exemplo.



Fonte: AUTOR (2022)

Figura 4.24 - Ilustração do esforço normal nos pilares do Exemplo 3 com as respectivas variações
Fonte: AUTOR (2022)

4.3.1 Redistribuição dos esforços em: Pilares

Após a remoção do pilar P6, o edifício fictício de 20 pavimentos foi novamente processado junto ao software CAD/TQS, no qual resultou em um novo relatório de esforços normais nos pilares, conforme exposto na Tabela 4.5 a seguir apenas para o 1º quadrante.

Tabela 4.5 - Comparativo entre o exemplo 1 e exemplo 3 após remoção do pilar P6

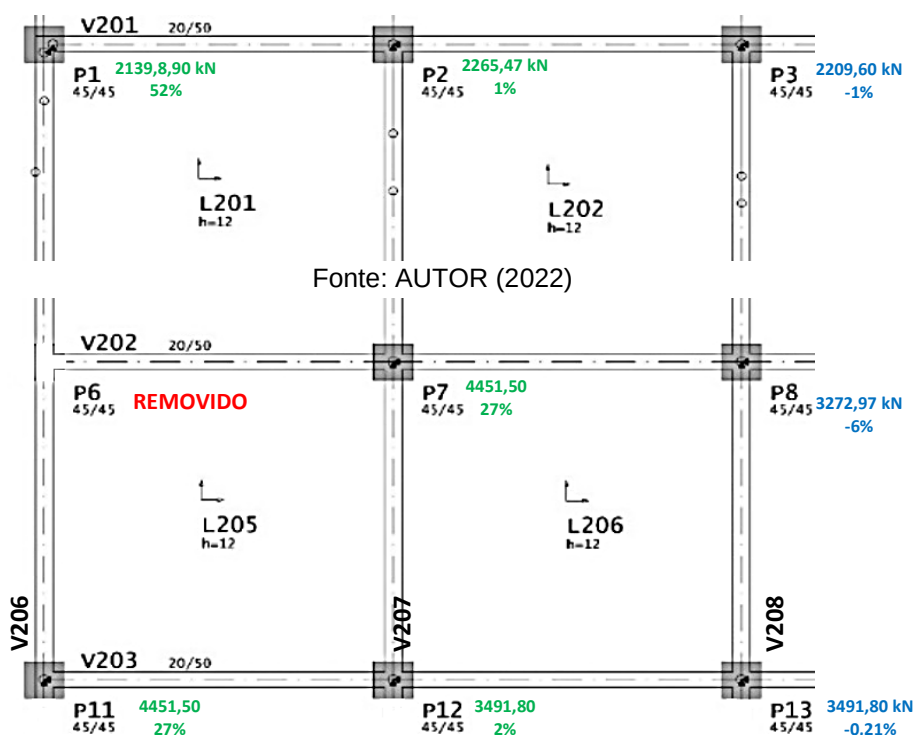
PILARES	EXEMPLO 1: MODELO ORIGINAL (kN)	EXEMPLO 3: P6 REMOVIDO (kN)	VARIAÇÃO DO ESFORÇO APÓS REDISTRIBUIÇÃO
P1	1412,20	21390,80	52%
P2	2235,50	2265,47	1%
P3	2220,80	2209,60	-1%
P6	2214,90	-	-
P7	3502,80	4451,50	27%
P8	3468,70	3272,97	6%
P11	2225,20	3010,40	35%

P12	3520,00	3576,90	2%
P13	3499,20	3491,80	-0,21%

A Figura 4.25 - Ilustração do esforço normal nos pilares do Exemplo 3 com as respectivas variações

Figura 4.26 ilustra a redistribuição dos esforços normais em cada pilar do pavimento térreo referente ao 1º quadrante após remoção do P6, juntamente com as porcentagens da variação desses esforços em comparação com o Exemplo 1. A cor verde, indica o aumento dos valores de esforço normal, enquanto os valores

Figura 4.25 - Ilustração do esforço normal nos pilares do Exemplo 3 com as respectivas variações apresentados na cor azul, indicam uma redução.



Portanto, é possível verificar que após a retirada do pilar P6, a redistribuição dos esforços ocorreu de forma preponderantemente nos pilares próximos a ele, que são eles, os pilares P1, P7 e P11, sendo que estes obtiveram incrementos consideráveis de carga conforme apresentado. Já os pilares P3, P8 e P13 tiveram um pequeno decréscimo de carga.

É importante ressaltar que nesta simulação, o software CAD/TQS apontou um erro grave referente ao dimensionamento/detalhamento da armadura do pilar P7 no trecho do térreo, indicando assim, que a resistência obtida foi inferior à solicitação calculada, sugerindo então um acréscimo de resistência ao pilar, ou seja, devemos incrementar essa resistência por meio do aumento da armadura, resistência do concreto ou aumentando as dimensões da seção transversal deste pilar.

Assim, se faz importante ressaltar as particularidades referentes ao Exemplo 3 após remover o pilar P6, no qual analisando o pilar P1 e comparando o referido pilar na situação original, exemplificada pelo **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, é possível observar que em sua seção transversal o referido apresenta um quantitativo de área de aço e já para a situação do Exemplo 3, exemplificada pelo Figura 4.28 - Seção transversal do pilar P1
(a) Situação original; (b) Após retirada do pilar P6

Figura 4.29b é acrescentado uma taxa de área de aço, com alteração no quantitativo bem como no diâmetro do aço. Podendo então caracterizar que o pilar P1 não conseguiria resistir após a redistribuição dos esforços em detrimento da retirada do pilar P6.

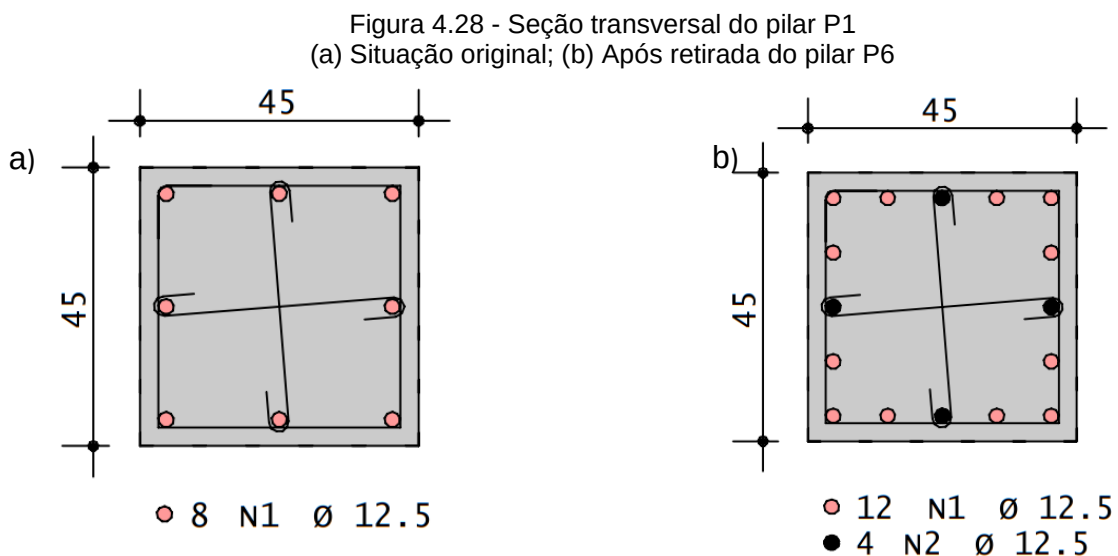


Tabela 4.6 – Comparativo entre os valores obtidos de momento fletor característico de solicitação M_{sk} entre o Exemplo 1 e Exemplo 3

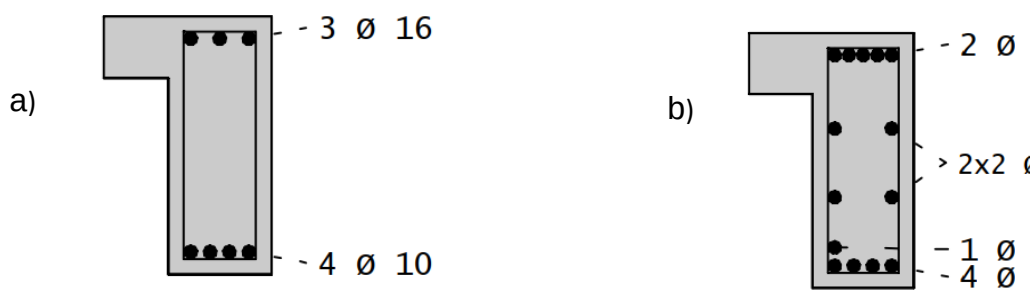
VIGAS	VÃO	MOMENTO FLETOR À ESQUERDA M_{SK} (kN.m)	VARIAÇÃO EM COMPARAÇÃO AO EXEMPLO 1	MOMENTO FLETOR MEIO DO VÃO M_{SK} (kN.m)	VARIAÇÃO EM COMPARAÇÃO AO EXEMPLO 1	MOMENTO FLETOR À DIREITA M_{SK} (kN.m)	VARIAÇÃO EM COMPARAÇÃO AO EXEMPLO 1
V201	I	72.270	-7%	31.800	-26%	61.270	-16%
	II	64.480	-5%	28.790	-11%	55.430	84%
V202	I	-	-	-	-	453.190	<u>404%</u>
	II	374.020	<u>347%</u>	112.900	268%	60.940	-26%
V203	I	85.590	-5%	35.750	-17%	79.290	-12%
	II	77.140	-8%	27.020	-1%	70.620	-16%
V206	III	150.220	<u>119%</u>	122.410	272%	-	-
	IV	-	-	124.940	190%	155.070	<u>99%</u>
V207	III	75.130	-9%	24.120	-22%	71.460	-15%
	IV	83.320	-8%	38.820	-10%	82.060	-14%
V208	III	73.340	-11%	25.080	-19%	72.550	-13%
	IV	82.010	-9%	38.180	-12%	80.830	-15%

Fonte: AUTOR (2022)

É importante ressaltar as particularidades referentes ao Exemplo 3 quando se remove o pilar P6, no qual analisando a viga V206 em seu trecho IV na situação original, exemplificada pelo **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, é possível observar e m sua seção transversal um quantitativo de área de aço e já para a situação do Exemplo 3, exemplificada pelo **Erro! Fonte de referência não encontrada.** é a crescentado uma taxa de área de aço, com alteração no quantitativo bem como no diâmetro do aço. Podendo então caracterizar que a viga V206 em seu trecho IV não conseguiria resistir após a redistribuição dos esforços em detrimento da retirada do pilar

P6.

Figura 4.34 - Seção transversal da viga V206
(a) Situação original; (b) Situação após remoção do pilar P6.



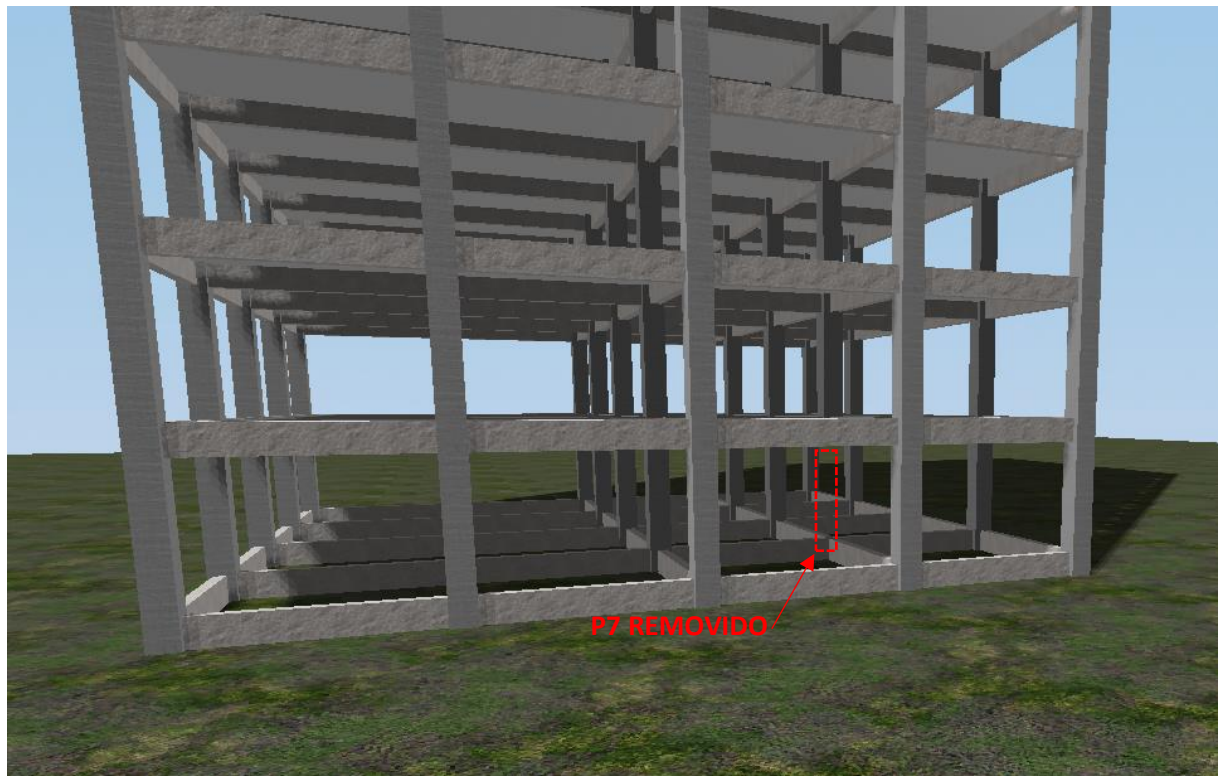
Fonte: AUTOR (2022)

4.4 EXEMPLO 4: REMOÇÃO DO PILAR P7 – PILAR DE CENTRO

O exemplo 4 aborda a remoção do pilar de centro P7 no pavimento térreo, sendo que este exemplo possui as mesmas características arquitetônicas e construtivas do exemplo original, com exceção da remoção do referido pilar. A Figura 4.37 - Ilustração do edifício fictício de 20 pavimentos em modelagem 3D após a remoção do pilar P7 no térreo

Figura 4.38 ilustra a disposição arquitetônica do exemplo.

Figura 4.37 - Ilustração do edifício fictício de 20 pavimentos em modelagem 3D após a remoção do pilar P7 no térreo



Fonte: AUTOR (2022)

4.4.1 Redistribuição dos esforços em: Pilares

Após a remoção do pilar P7, o edifício fictício de 20 pavimentos foi novamente processado junto ao software CAD/TQS, no qual resultou em um novo relatório de esforços normais nos pilares, conforme exposto na Tabela 4.7 a seguir, apenas para o 1º quadrante.

Tabela 4.7 - Comparativo entre o exemplo 1 e exemplo 4 após remoção do pilar P7

PILARES	EXEMPLO 1: MODELO ORIGINAL (kN)	EXEMPLO 4: P7 REMOVIDO (kN)	VARIAÇÃO DO ESFORÇO APÓS REDISTRIBUIÇÃO
P1	1412,20	2400,65	70%
P2	2235,50	3346,60	50%
P3	2220,80	2272,98	2%
P6	2214,90	430,37	-81%
P7	3502,80	-	-
P8	3468,70	4604,38	33%
P11	2225,20	3307,52	49%
P12	3520,00	4989,42	42%
P13	3499,20	3575,70	2%

Fonte: AUTOR (2022)

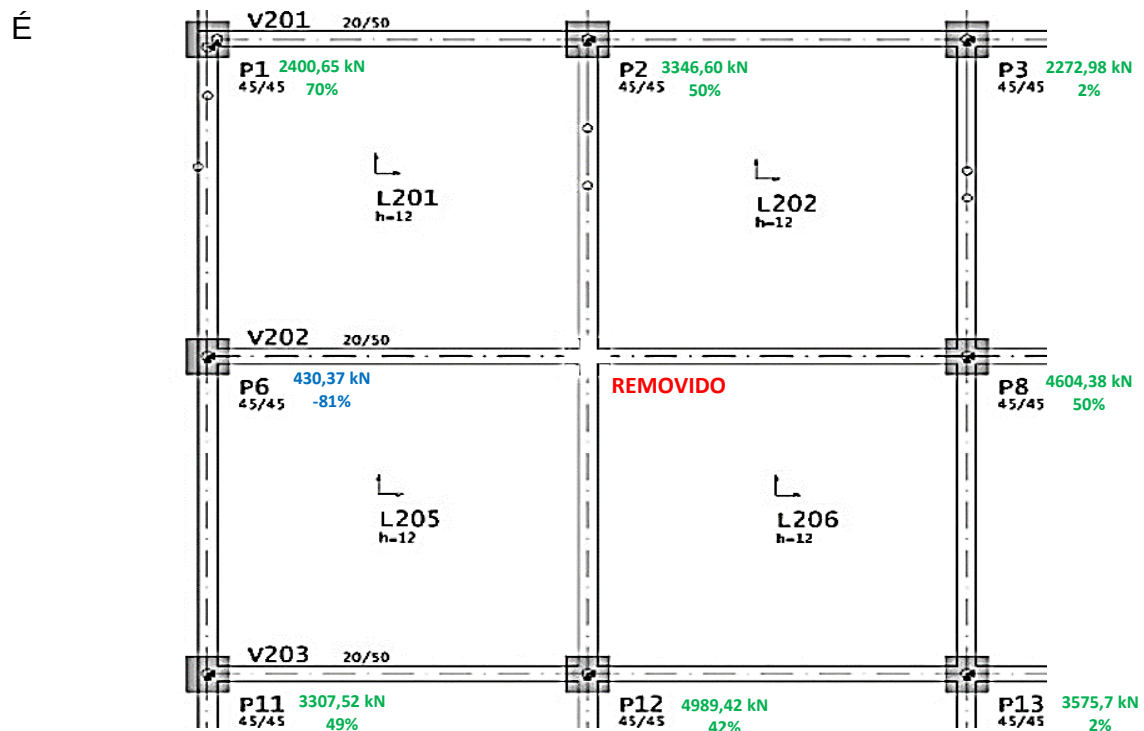
A Figura 4.40 - Ilustração dos esforço normal nos pilares do Exemplo 4 com as respectivas variações

Figura 4.41 ilustra a redistribuição dos esforços normais em cada pilar do pavimento térreo referente ao 1º quadrante após remoção do P7, juntamente com as porcentagens de variação desses esforços em comparação com o Exemplo 1. A cor verde, indica o aumento dos valores de esforço normal, enquanto os valores

Figura 4.40 - Ilustração dos esforço normal nos pilares do Exemplo 4 com as respectivas variações apresentados na cor azul, indicam uma redução.

Fonte: AUTOR (2022)

É possível observar que os pilares mais solicitados da estrutura são os pilares P1, P2, P8, P11 e P12, com carregamentos que variam entre 2.400,65 kN a 4.604,38 kN. Posteriormente, mesmo com redistribuições de carregamentos tão elevadas, é possível observar decréscimos de carregamentos no pilar de borda P6, com carregamento igual a 430,37 kN.



importante ressaltar que nesta simulação, o software CAD/TQS apontou um erro

grave referente ao dimensionamento/detalhamento da armadura nos pilares P8 e P12 no trecho do térreo, indicando assim, que a resistência obtida foi inferior à solicitação calculada, sugerindo então um acréscimo de resistência ao pilar, ou seja, devemos incrementar essa resistência por meio do aumento da armadura, resistência do concreto ou aumentando as dimensões da seção transversal deste pilar.

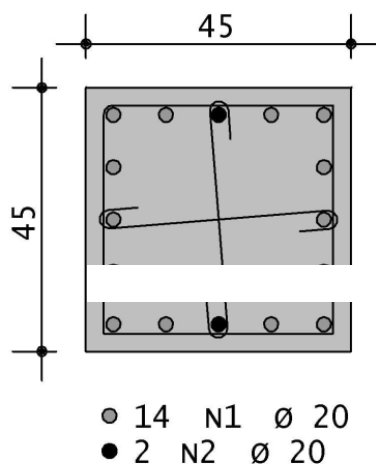
Assim, se faz importante ressaltar as particularidades referentes ao Exemplo 4 após remover o pilar P7, no qual analisando o pilar P8 e comparando o referido pilar na situação original, exemplificada pelo Figura 4.43 - Seção transversal do pilar P8
(a) Situação original; (b) Após remoção do pilar P7

Figura 4.44a, é possível observar que em sua seção transversal o referido apresenta um quantitativo de área de aço e já para a situação do Exemplo 4, exemplificada pelo Figura 4.43 - Seção transversal do pilar P8
(a) Situação original; (b) Após remoção do pilar P7

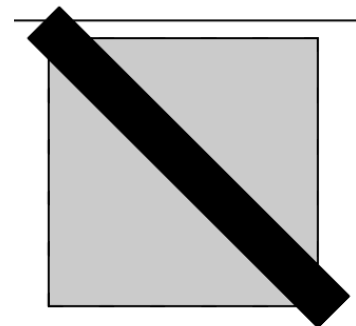
Figura 4.44b não foi possível dimensionar o elemento estrutural. Podendo então caracterizar que o pilar P8 não conseguiria resistir após a redistribuição dos esforços em detrimento da retirada do pilar P7.

Figura 4.43 - Seção transversal do pilar P8
(a) Situação original; (b) Após remoção do pilar P7

a)



b)



Fonte: AUTOR (2022)

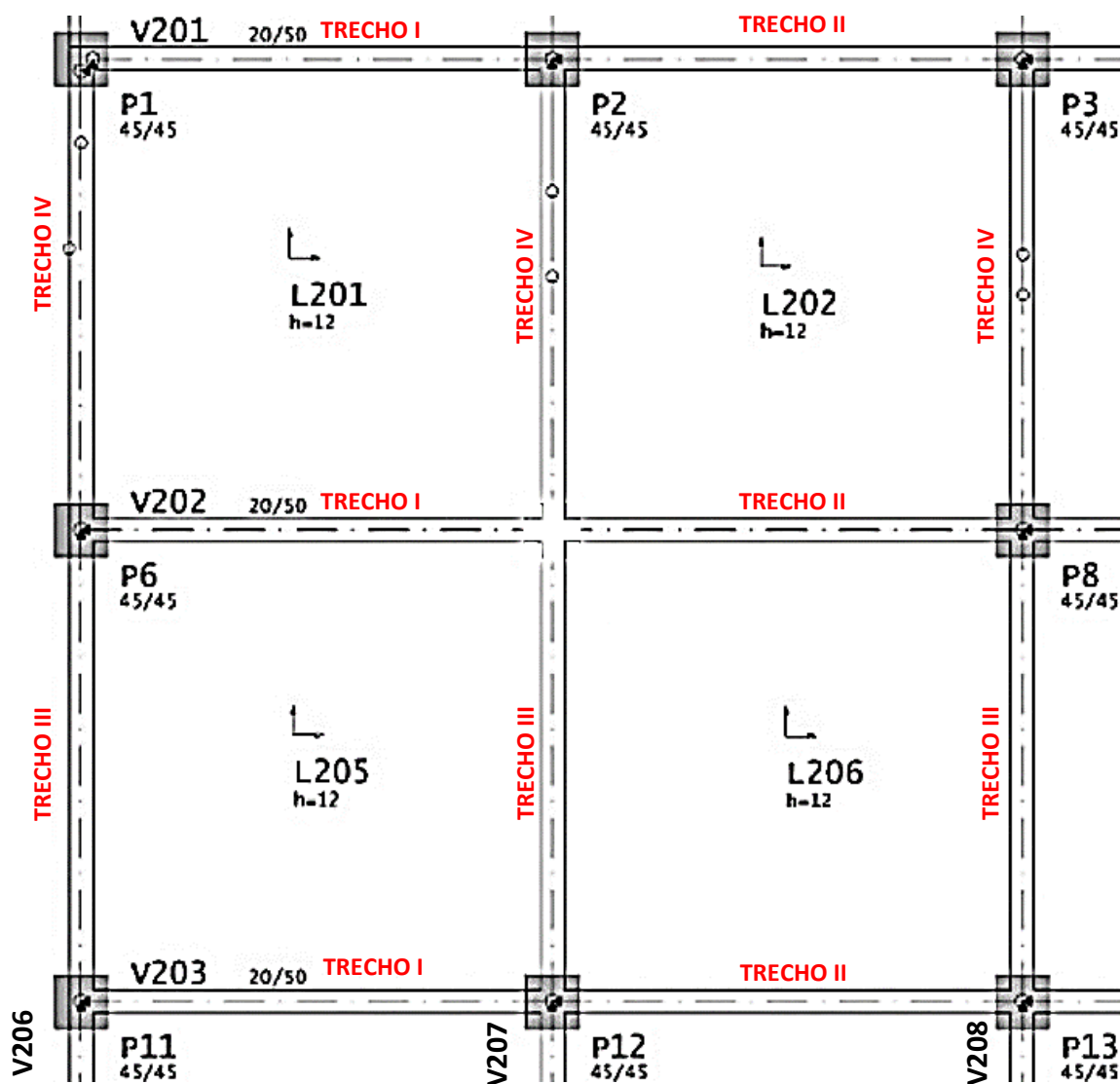
4.4.2 Redistribuição dos esforços em: Vigas

Seguindo a mesma metodologia dos exemplos anteriores, após a remoção do pilar P7, os valores obtidos referentes ao momento fletor nas vigas que constituem o 1º quadrante estão expostos na

Tabela 4.8. É possível observar que as vigas V202 e V207, em seu trecho I e trecho III, respectivamente, apresentam consideráveis acréscimos de esforço de momento fletor. Com a remoção do pilar, o encontro destes trechos é caracterizado como uma viga sendo apoiada sobre outra viga. A Figura 4.46 - Ilustração do encontro entre as vigas V202 e V207

Figura 4.47 ilustra essa situação:

Figura 4.46 - Ilustração do encontro entre as vigas V202 e V207



Fonte: AUTOR (2022)

Tabela 4.8 - Comparativo entre os valores obtidos de momento fletor característico de solicitação M_{sk} entre o Exemplo 1 e Exemplo 4

VIGAS	VÃO	MOMENTO FLETOR À ESQUERDA M_{SK} (kN.m)	VARIAÇÃO EM COMPARAÇÃO AO EXEMPLO 1	MOMENTO FLETOR MEIO DO VÃO M_{SK} (kN.m)		VARIAÇÃO EM COMPARAÇÃO AO EXEMPLO 1	MOMENTO FLETOR À DIREITA M_{SK} (kN.m)	VARIAÇÃO EM COMPARAÇÃO AO EXEMPLO 1
V201	I	75.590	-3%	35.570		-17%	61.060	-16%
	II	65.380	-4%	29.730		-8%	55.860	85%
V202	I	74.230	-23%	347.050		<u>699%</u>	569.740	<u>533%</u>
	II	454.570	<u>443%</u>	127.910		317%	54.980	-33%
V203	I	88.800	-1%	35.900		-17%	79.210	-12%
	II	76.690	-9%	27.020		-1%	72.300	-14%
V206	III	189.440	<u>177%</u>	164.270		<u>399%</u>	-	-
	IV	-	-	165.810		<u>284%</u>	192.310	146%
V207	III	701.090	<u>746%</u>	924.590		<u>2878%</u>	320.480	<u>283%</u>
	IV	-	-	-		-	-	-
V208	III	75.220	-9%	25.210		-19%	71.200	-15%
	IV	82.280	-9%	38.880		-10%	82.330	-13%

Fonte: AUTOR (2022)

Após o processamento, o software CAD/TQS apontou diversos erros graves referente ao dimensionamento/detalhamento da armadura das vigas V202 e V207 nos trechos I e III, respectivamente. Indicando que a força atuante de cálculo, relativa à ruína das diagonais comprimidas de concreto, ultrapassou o valor limite de resistência, tanto para a viga V202 quanto para a V207.

Para que fosse possível o dimensionamento, seria necessário tomar algumas medidas, como por exemplo, incrementar à resistência por meio do aumento da resistência do concreto ou aumentando as dimensões da seção transversal das vigas.

CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Inicialmente, o presente trabalho apresentou uma breve introdução ao tema colapso progressivo, expondo suas principais definições, os tipos existentes, as causas de ocorrência, as estruturas mais suscetíveis e as possíveis medidas para prevenção, tornando evidente a importância do assunto e a necessidade de uma norma Brasileira que aborde de forma mais aprofundada e específica, os parâmetros relacionados ao dimensionamento e verificação para aplicação nos projetos e execuções referente a este tema.

Posteriormente, com auxílio do software CAD/TQS, foi modelado um edifício fictício de 20 pavimentos e analisada a redistribuição dos esforços em elementos estruturais, tais como vigas e pilares, através da retirada de pilares predeterminados no pavimento térreo, sendo um pilar de canto, um pilar de borda e um de centro, formulando assim, quatro exemplos distintos.

Com os exemplos formulados, foi possível observar uma variação padrão da maneira da redistribuição dos esforços para o edifício fictício estudado, onde as redistribuições para o Exemplo 2 ocorreram de forma mais elevada nos elementos estruturais que, associados entre si, formam um quadrante junto ao pilar removido, sendo este o P1, tendo uma variação de esforço normal de 39,69% para o Pilar P6 e 423% para o momento fletor característico de solicitação atuante na viga V201, trecho I pela direita. Para o Exemplo 3, as redistribuições também ocorreram de forma elevada nos elementos estruturais que associados entre si, formam um quadrante junto ao pilar removido, sendo este o P6, tendo uma variação de esforço normal de 52% para o Pilar P1 e 404% para o momento fletor característico de solicitação atuante na viga V202, trecho I pela direita. Por fim, para o Exemplo 4, as redistribuições ocorreram de forma também elevada nos elementos estruturais, acrescentando uma variação de esforço normal de 70% para o Pilar P1 e de 533% para o momento fletor característico de solicitação atuante na viga V202, trecho I pela direita.

Em relação a possibilidade da ocorrência do fenômeno de colapso progressivo, é possível identificar nos Exemplos 2, 3 e 4. Embora neste trabalho nenhum elemento estrutural tenha sido avaliado quanto a capacidade de resistir a redistribuição dos esforços calculados, é possível observar que nestes exemplos, não foi possível

realizar o dimensionamento dos elementos estruturais quando submetidos a tais elevados esforços, podendo caracterizar assim, uma situação hipotética em que se um edifício fosse dimensionado conforme o Exemplo 1 e que por algum motivo ocorresse a perda dos pilares característicos dos Exemplos 2, 3 e 4, poderia sim existir a possibilidade da ocorrência do fenômeno, uma vez que, ainda na situação hipotética, as características vinculadas as medidas de prevenção ao fenômeno destacadas neste estudo, não foram suficientes para mitigar a possibilidade da ocorrência do colapso progressivo da estrutura analisada.

Assim, como sugestão para futuros trabalhos relacionados ao tema, é possível identificar que alterações nos tipos de lajes e/ou sistemas estruturais podem enriquecer ainda mais o desenvolvimento deste tema.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos. 3 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2014. 238 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6120**: Ações para cálculo de estruturas de edificações. 2 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2019. 60 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. 3 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2017. 86 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8681**: Ações e segurança nas estruturas. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2004. 18 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6123**: Forças devidas ao vento em edifícios. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 1988. 66 p.
- DIMAS, T. dos S. **Análise de estruturas de edifícios sujeitas a ações acidentais**. 2014. 80 p. Dissertação de mestrado – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.
- EL DEBS, M. K. **CONCRETO PRÉ-MOLDADO: Fundamentos e Aplicações**. São Carlos: EESC - USP, 2000.
- FELIPE, T. R. C. **Novo método para a avaliação do risco de colapso progressivo em edifícios de alvenaria estrutural**. 2017. 148p. Dissertação de mestrado (Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.
- GACEL ENGENHARIA. **Diagnóstico sobre Desabamento Edifício Liberdade - Cinelândia**. Disponível em: <http://www.gacel.eng.br/edificioliberdade.html>. Acesso em: 01 maio 2021.
- INCRÍVEL HISTÓRIA. **Klahoma, 1995: o pior atentado terrorista doméstico dos EUA**. 2018. Disponível em: <https://incrivelhistoria.com.br/oklahoma-atentado-terrorista-domestico/>. Acesso em: 01 maio 2021.
- ISTOÉ, Revista; GOMES, Luciani; ALECRIM, Michel; AQUINO, Wilson (ed.). **O preço da imprudência**. 2012. Disponível em: <https://istoe.com.br/188471>. Acesso em: 01 maio 2021.
- KOZLOVA, Polina. **The phenomenom of progressive collapse according to russian norms**. 2013. 92 p. Bachelor's thesis (Degree in Civil and Construction Engineering) - Saimaa University of Applied Sciences, Lappeenranta.
- LARANJEIRAS, Antônio Carlos Reis. **Colapso Progressivo dos Edifícios: Breve Introdução**. Atualizado em: ago. 2011. Disponível em: http://download.tqs.com.br/download/JornalTQS33_ArtigoAntonioCarlosRLaranjeiras.pdf. Acesso em: 12 jun. 2021.
- LONGO, Henrique I. **Estudo da viabilidade das armaduras nas vigas para evitar o colapso progressivo**. Rio de Janeiro, p. 1-10. maio 2016.

NAIR, R. S. **Progressive Collapse Basics**. North American Steel Construction Conference, March 24-27, Long Beach, 2007.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY INTERAGENCY OR INTERNAL REPORT. **NISTIR 7396**: Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings. USA, U. S. Department Of Commerce, 2007.

PEREIRA, Rodrigo Costa. **Análise de um edifício de concreto armado considerando o colapso progressivo**. 2015. 80 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015.

CIMENTO ITAMBÉ, Altair Santos. **Bons e maus exemplos ajudam a evitar colapso progressivo**. 2012. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/bons-e-maus-exemplos-ajudam-a-evitar-colapso-progressivo/>. Acesso em: 01 maio 2021.

SOUSA, L. J. O. (2021). **Redistribuição de esforços verticais em uma edificação frente à possibilidade de colapso progressivo**. 79p. Trabalho de conclusão do curso de Bacharelado em Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. Jataí, 2021.

STAROSSEK, Uwe. **Book: Topology of progressive collapse**. Hamburg University of Technology. Alemanha, 2009.

SANTOS, Mirella A. T. R. **Estudo de viabilidade de Edifícios em concreto armado projetados para permitir a ruptura de qualquer dos seus pilares na base**. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2012.

TERRA. **Justiça começa a ouvir envolvidos na queda do Edifício Liberdade**. 2013. Disponível em: <https://www.terra.com.br/noticias/brasil/cidades/rio-justica-comeca-a-ouvir-envolvidos-na-queda-do-edificio-liberdade,7d69be73d11e1410VgnC2000000dc6eb0aRCRD.html>. Acesso em: 01 maio 2021.

VALISIEVA, A. **Progressive collapse and methods of prevention**. Dissertação (Bachelor's Thesis) – Saimaa University of Applied Sciences, Lappeenranta, 2013.

WIKIPÉDIA. **Ponte Octávio Frias de Oliveira**. 2021. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ponte_Oct%C3%A1vio_Frias_de_Oliveira. Acesso em: 20 maio 2021